

中国电气工程大典编辑委员会



CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

第 13 卷

交通电气工程

主编 刘友梅 陈清泉 冯江华
程树康 高培庆



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



组 编

中国电工技术学会
中国机械工程学会
中国电机工程学会
中国动力工程学会
中国水力发电工程学会

《中国电气工程大典》

- 第1卷 现代电气工程基础
- 第2卷 电力电子技术
- 第3卷 电气工程材料及器件
- 第4卷 火力发电工程(上、下)
- 第5卷 水力发电工程
- 第6卷 核能发电工程
- 第7卷 可再生能源发电工程
- 第8卷 电力系统工程
- 第9卷 电机工程
- 第10卷 输变电工程
- 第11卷 配电工程
- 第12卷 船舶电气工程
- 第13卷 交通电气工程
- 第14卷 建筑电气工程
- 第15卷 电气传动自动化

ISBN 978-7-5083-7728-5



9 787508 377285 >

定价: 230.00元

CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第 13 卷

交通电气工程

主编 刘友梅 陈清泉 冯江华
程树康 高培庆



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的。它是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等15卷。

本书为第13卷，交通电气工程卷。主要内容包括汽车电气和轨道交通电气。

本书主要供电气工程领域技术人员和管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国电气工程大典. 第13卷, 交通电气工程 / 刘友梅等主编; 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-7728-5

I. 中… II. ①刘…②中… III. ①电气工程-中国②交通工程: 电气工程-中国 IV. TM U491

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 114134 号

中国电力出版社出版发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年1月第1版 2009年1月北京第1次印刷

880mm×1230mm 1/16 • 53印张 • 2468千字 • 2插页

定价 230.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

中国电气工程大典

编辑委员会

- 主任：陆燕荪 原机械工业部副部长、教授级高级工程师
中国机械工程学会名誉理事长
- 陆延昌 原电力工业部副部长、教授级高级工程师
中国电机工程学会理事长
- 执行主任：周鹤良 原机械工业部电工局局长、教授级高级工程师
中国电工技术学会名誉理事长
- 宋天虎 原机械工业部科技司司长、教授级高级工程师
中国机械工程学会常务副理事长
- 副主任：潘崇义 中国电工技术学会副理事长、教授级高级工程师
- 吴玉生 中国电机工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 邰凤山 中国水力发电工程学会副理事长、教授级高级工程师
- 严宏强 中国动力工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 宗 健 中国电力出版社有限公司董事长、总经理、编审



委 员：（按姓氏笔画排列）

丁 杰	卜广全	于 龙	于坤山	于 明	于新颖	马小亮	马文忠	马伟明	马伟斌
马旭东	马济泉	马晓茜	马隆龙	丰镇平	王之杰	王为民	王正鸣	王占奎	王永骥
王成山	王兆安	王志峰	王作民	王国海	王明渝	王金元	王学伟	王泽忠	王建生
王建华	王绍武	王春华	王厚余	王炳忠	王 勇	王素英	王振铭	王 乘	王维洲
王景芹	王 强	王锡凡	王新新	王黎明	王德宽	王赞基	文习山	文劲宇	方晓燕
方 磊	尹天文	邓长胜	孔 力	孔伯汉	孔昭年	石萍萍	卢 强	卢澎湖	叶奇蓁
田东强	田培斌	史进渊	史毓珍	白少林	白俊光	白晓民	白继彬	冯江华	司马文霞
邢馥吏	戎一农	吕征宇	吕鸿达	朱庆明	朱英浩	朱宝田	朱晓明	朱家驹	朱耀泉
仲明振	任兆宏	任修明	任俊生	危师让	邬 雄	刘大明	刘广峰	刘卫宁	刘友梅
刘公直	刘文华	刘平安	刘 伟	刘仲儒	刘希清	刘 杰	刘尚明	刘国林	刘泽洪
刘建飞	刘建明	刘屏周	刘瑛岩	刘德志	齐剑波	关志成	江秀臣	江哲生	池 涌
汤 涌	汤蕴林	祁恩兰	许江宁	许忠卿	许洪华	阮江军	阮新波	阮 毅	孙才新
孙凤杰	孙成群	孙 林	孙牧海	严宏强	严陆光	严俊杰	严 萍	苏秀革	杜正春
杜毅威	杨玉岗	杨守权	杨寿敏	杨其国	杨奇逊	杨奇娟	杨怡元	杨俊智	杨 耕
杨维迅	杨 雯	杨道刚	杨德才	李 卫	李文健	李永东	李成榕	李 旭	李兴源
李安定	李 农	李若梅	李杰仁	李宝树	李定中	李 奎	李彦明	李晓明	李颂哲
李朗如	李培植	李盛涛	李崇坚	李道本	李道林	李 鹏	李 新	李肇林	李耀星
邴凤山	肖立业	肖昌汉	肖辉乾	肖湘宁	肖耀荣	吴正国	吴创之	吴运东	吴志坚
吴国平	吴质根	吴晓波	吴培豪	邱爱慈	何木云	何阿平	何金良	何梓年	何湘宁
何瑞华	佟为明	余 志	余贻鑫	邹云屏	邹金昌	邹孟奇	应百川	辛德培	辛耀中
汪继强	汪集旻	汪樵生	汪德良	沈小宇	沈 江	沈 兵	沈邱农	沈梁伟	宋文武
宋汉武	宋哲仁	迟 速	张艺滨	张文才	张玉花	张业广	张乔根	张仲超	张兆鹤
张伯明	张冶文	张启平	张 波	张 亮	张洪钟	张祖平	张勇传	张晓江	张晓锋
张 敏	张 望	张景洲	陆永平	陆宽惠	陆俭国	陆剑秋	陆祖良	陆家榆	陆嘉明
陈汉民	陈伟根	陈 仲	陈众励	陈庆国	陈 坚	陈伯时	陈国柱	陈治明	陈建飏
陈 星	陈思铨	陈 勇	陈哲良	陈恩鉴	陈雪梅	陈清泉	陈超志	陈敬超	陈辉明
陈黎平	陈德昌	陈德胜	陈德桂	邵 岚	苟锐锋	林云生	林公舒	林集明	易学勤
罗永浩	罗景华	金如麟	周小谦	周以国	周双喜	周 平	周仲仁	周远翔	周孝信
周建中	周思刚	周家启	周 娟	周锡生	郑小康	郑云之	郑永红	郑克文	郑明光
宗建华	宓传龙	孟庆东	赵玉文	赵光宙	赵 伟	赵红一	赵昌宗	赵治华	赵宗让
赵荣祥	赵相宾	赵 洁	赵 敏	赵婉君	赵 琨	赵 毅	赵黛青	荣命哲	胡方荪

胡安	胡学浩	胡振岭	胡鉴清	段善旭	段献忠	侯子良	俞忠德	俞智斌	饶芳权
施围	施鹏飞	洪元颐	姚本荣	姚尔昶	姚家祎	姚福生	贺建华	贺益康	贺湘琨
贺德馨	骆仲泱	秦和	秦裕碧	袁余军	袁建生	袁建敏	都兴有	耿英三	莫会成
贾东旭	夏立	夏祥贵	顾四行	顾国彪	钱昌燕	钱宝良	钱照明	倪维斗	徐元辉
徐凤刚	徐永法	徐兆丰	徐国政	徐洪海	徐殿国	徐铎	徐德鸿	殷禄祺	奚大华
高子瑜	高文胜	高庆国	高京生	高理迎	高培庆	郭天兴	郭国顺	郭保良	郭洁
郭振岩	郭灏	唐任远	唐炬	唐春潮	陶星明	黄少锋	黄仁乐	黄妙庆	黄其励
黄国治	黄学清	黄宝生	黄晓丽	黄崇祺	黄景湖	梅生伟	曹一家	曹惠彬	戚庆成
崔志强	崔翔	康勇	章名耀	章定邦	梁维宏	梁维燕	梁曦东	彭宗仁	葛大麟
葛少云	葛诗慧	葛蓉生	葛溪亭	葛增茂	董卫国	蒋洪德	蒋善定	韩民晓	韩英铎
惠世恩	覃大清	程天麟	程均培	程时杰	程树康	程浩忠	傅书遏	焦侬	焦树建
舒惠芬	曾文星	曾正中	曾明富	曾南超	曾雁鸿	曾嵘	游亚戈	谢开贵	谢秋野
雷银照	雷清泉	曾满慧	蔡崇积	管瑞良	廖胜松	廖瑞金	缪鸿兴	黎晓晖	颜渝坪
薛以太	戴先中	戴庆忠	戴慧珠	魏光辉					



序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放 30 年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至 2007 年底，我国发电装机容量达 7.13 亿 kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流 1000kV、直流 ±800kV 特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入 21 世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近 2000 位专家和学者，历

时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日

徐匡迪

前言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放 30 年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和运用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统和信息管理系统的广泛应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术在电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约 2000 位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。

本套书的编写工作于 2004 年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过 4 年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共 15 卷约 5000 万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放 30 年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌

本 卷 前 言

交通是国家经济的基础,是人类活动的重要方式。工业革命给人类出行带来了发达的陆上交通,随着技术的推进,发展到包括水上交通和空中交通在内的综合交通体系,从而为人类提供了立体的全方位综合交通服务。交通装备是交通领域的技术核心,而陆上交通始终是综合交通中的主干,当前陆上交通装备已成为人类活动最亲近、最直接的出行工具。现代陆上交通装备包括汽车与轨道交通车辆,它们都是机电一体化产品,电气化推动了陆上交通装备的技术进步,电气工程已越来越在陆上交通装备中占据主导地位。

《中国电气工程大典》第13卷“交通电气工程”是对陆上交通装备——汽车与轨道交通装备的电气工程重点撰稿的篇章。本卷共分两篇:第1篇介绍了汽车电气,由概论、汽车电源与起动机、动力传动电气控制系统、汽车安全运行电气控制系统、汽车辅助电气系统、汽车车上网络、智能交通系统、电动汽车共8章构成;第2篇介绍了轨道交通电气,由总论、牵引电气系统、牵引电气设备、客车电气设备、牵引供电系统与设备、通信信号与信息技术、磁浮交通系统、电磁兼容共8章构成。书中介绍的内容有传统的电气工程技术,更着重有高新的电气工程技术,尽量使本书成为集专业手册和学术专著双重功能的图书。

本书邀请了汽车和轨道交通领域上百名专家、学者参加编写工作,历时近2年,通过3级多次审改稿件完成本卷撰稿工作。主要编写人员如下:

第13卷卷主编:刘友梅、陈清泉、冯江华、程树康、高培庆

第1篇主编:陈清泉、佟为明、程树康

执行编辑:柴 凤、侯云鹏

第1章主笔:陈清泉、佟为明、程树康

第2章主笔:逯仁贵、朱春波

第3章主笔:宋立伟、侯云鹏

第4章主笔:侯云鹏、吴红星

第5章主笔：刘晓芳、裴宇龙
第6章主笔：刘洪臣、柴 凤
第7章主笔：吴红星、佟为明
第8章主笔：程 远、盖晓东
第2篇主编：刘友梅、冯江华
执行编辑：姚永康、谭雪谦
第1章主笔：刘友梅、杨 颖
第2章主笔：冯江华、李春阳
第3章主笔：高培庆、严云升
第4章主笔：陈 浩、谭寿云
第5章主笔：王卫安、严树刚
第6章主笔：申大川、杨期翔、张明武
第7章主笔：连级三、胡基士
第8章主笔：王益民、王正星

本卷的编写过程是在主编单位哈尔滨工业大学、株洲南车时代电气股份有限公司、南车株洲电力机车有限公司、北京全路通信信号研究设计院大力支持下得以顺利完成的，在此对以上单位领导和参与指导的相关专家致以衷心的感谢。

我们全体作者的愿望是尽自己能力使本书能代表目前我国交通电气领域的技术水平，反映行业技术的发展。书中凝聚了全体作者的心得与经验，愿与读者共享，并接受读者的检验。书中若有不妥之处，殷切期望读者给予批评指正。

主 编



中国电气工程大典

第13卷

交通电气工程

编辑出版人员名单

责任编辑 刘广峰 马琳 潘琳 李慧芳

穆智勇 郭丽然

复审人员 刘广峰

封面设计 郑小平 王英磊

版式设计 张秋雁

责任校对 罗凤贤 刘振英

责任印制 甄茁



目 录

序	
前言	
本卷前言	
第1篇 汽车电气	1
第1章 概论	3
1 汽车电气工程的概念	3
1.1 汽车电气工程的基本概念	3
1.2 汽车电气工程的范畴	3
2 汽车电气电子系统的组成与功能	3
2.1 汽车电器系统的组成与功能	3
2.2 汽车电子控制系统的组成与功能	4
2.3 汽车电子信息系统的组成与功能	17
2.4 智能交通系统的组成与功能	17
2.5 汽车车上网络的组成与功能	18
2.6 汽车电机系统的组成与功能	21
3 汽车电气电子技术的发展	21
3.1 汽车电气电子技术的初期和近期发展历程	21
3.2 汽车电气电子技术的现状	24
3.3 汽车电气电子技术的发展趋势	25
4 汽车电气系统的特点	25
4.1 双电源	25
4.2 低压	25
4.3 直流	26
4.4 部分单线制	26
4.5 负极搭铁	26
5 新型汽车及相关电气电子技术	26
5.1 电动汽车	26
5.2 节能环保汽车及其技术	29
第2章 汽车电源与起动机	30
1 蓄电池	30
1.1 蓄电池和汽车其他电器的连接	30
1.2 蓄电池的选用与安装	30
1.3 铅酸蓄电池的构造与型号	30
1.4 蓄电池工作原理	32
1.5 蓄电池工作特性	33
1.6 蓄电池容量及其影响因素	35
1.7 蓄电池的故障及其排除	36
1.8 蓄电池的充电和充电方法	37
1.9 蓄电池的使用与维护	39
1.10 干荷电和湿荷电蓄电池	41
1.11 免维护蓄电池	41
1.12 胶体电解质蓄电池	42
1.13 碱性蓄电池	42
1.14 新型蓄电池	43
2 交流发电机及其调节器	44
2.1 交流发电机	44
2.2 调节器	48
3 起动机	59
3.1 起动系统的要求	59
3.2 直流电动机	61
3.3 起动机的特性	62
3.4 起动机基本数据的确定	63
3.5 起动机的传动机构	65
3.6 起动机的分类与型号	66
3.7 强制啮合式起动机	67
3.8 电枢移动式起动机	68
3.9 减速式起动机	69
3.10 永磁减速式起动机	69
3.11 起动机的保护电路	70
3.12 起动系的故障诊断	71
3.13 起动机的检查	71
3.14 起动机的调整与试验	73
4 汽车配线	74
4.1 汽车的配线	74
4.2 电路图	82
第3章 动力传动电气控制系统	88
1 汽车发动机控制系统	88
1.1 汽车发动机控制系统简介	88
1.2 汽油喷射系统的组成与工作原理	88
1.3 喷油量的确定与控制	89
1.4 供油系统的控制	90
1.5 进气系统的控制	91
1.6 点火系统的控制	91
1.7 怠速控制系统	92
1.8 排放净化控制系统	93
1.9 巡航控制	97
1.10 柴油发动机电子控制系统	98
2 汽车自动变速器控制系统	100
2.1 自动变速器电控系统基本工作原理	101
2.2 变矩器与变速器	101
2.3 液压控制系统	103
2.4 电子控制系统	105
3 汽车悬架控制系统	108
3.1 悬架的作用	108
3.2 减振器阻尼力控制	109
3.3 非独立悬架与独立悬架	111
3.4 主动悬架	113
4 汽车转向控制系统	116
4.1 转向助力控制系统	116
4.2 四轮转向控制系统	118
第4章 汽车安全运行电气控制系统	122
1 故障自诊断系统	122
1.1 汽车故障诊断技术的发展趋势	122
1.2 故障自诊断系统的组成与功能	123
1.3 故障自诊断系统的诊断原理	125
1.4 发动机控制系统故障诊断检修程序与方法	126
1.5 故障自诊断测试方式与内容	127
1.6 故障自诊断测试工具	128
1.7 故障自诊断测试方法	129
2 电子控制主动安全系统	129
2.1 防抱死制动的基本原理	129

2.2 防抱死制动系统的组成	130	2.4 引脚排列	218
2.3 防抱死制动系统的分类	131	2.5 功能说明	218
2.4 防抱死制动电子控制系统	132	3 CAN 控制器接口——PCA82C250	238
2.5 防抱死制动液压控制系统	134	3.1 特性	238
2.6 防抱死制动系统控制过程	136	3.2 一般说明	238
2.7 电子控制制动力分配技术	138	3.3 框图	239
2.8 驱动轮防滑转的控制原理	139	3.4 引脚排列	239
2.9 防滑转控制系统控制过程	141	3.5 功能说明	239
2.10 防抱死制动系统故障自诊断测试	142	3.6 极限值	239
3 电子控制被动安全系统	144	3.7 热特性	240
3.1 安全气囊系统组成与分类	144	3.8 特性	240
3.2 安全气囊系统的控制过程	145	4 其他 CAN 控制器与控制器接口	241
3.3 安全气囊系统的结构特点	146	4.1 CAN 总线发送/接收驱动器	241
3.4 安全气囊系统的保险装置	149	4.2 独立 CAN 控制器	243
3.5 座椅安全带控制系统	151	4.3 嵌有 CAN 控制器的微控制器	244
第 5 章 汽车辅助电气系统	153	5 LIN	245
1 汽车灯具与照明系统	153	5.1 LIN 技术规范 2.0	245
1.1 分类和命名	153	5.2 LIN 接口	247
1.2 常见国内外汽车用灯具型号、性能特征 及主要技术参数	153	6 基于时间触发的车上网络协议标准	250
1.3 照明装置的结构与原理	156	6.1 Flex Ray	250
1.4 照明系统的控制	163	6.2 Byteflight	252
2 汽车仪表及报警指示装置	168	6.3 TTP/C	254
2.1 电子仪表	168	6.4 TTCAN	255
2.2 组合仪表	170	7 SAE J1850	257
2.3 报警指示装置	171	8 车上媒体网络 MOST	257
3 汽车空调系统	173	8.1 MOST 基本结构	257
3.1 相关技术参数	174	8.2 MOST 信息帧	258
3.2 空调制冷系统	179	8.3 MOST 应用层通信协议	258
3.3 取暖与配气系统	179	8.4 MOST 网络服务层	260
3.4 空调系统的控制	181	8.5 MOST 低层服务与发送/接收器	260
3.5 自动空调系统	184	9 SAE J1939	261
4 汽车音响	186	9.1 通信结构	262
4.1 概述	186	9.2 预分配值	264
4.2 基本组成	188	10 车载诊断协议——KWP2000	265
4.3 无线电防干扰装置	191	10.1 物理层	265
4.4 使用与维护	192	10.2 数据链路层	265
5 辅助汽车电器	193	10.3 实现	267
5.1 电源总开关	193	11 汽车车上网络应用实例	269
5.2 柴油机的辅助起动装置	195	11.1 车身 CAN 网络	269
5.3 晶体管电动燃油泵	196	11.2 动力传动系统 CAN 网络	270
5.4 汽车防盗系统	198	11.3 MOST 在汽车媒体网络中的应用	270
5.5 电动雨刷器及清洗装置	201	11.4 LIN 网络应用	270
5.6 汽车电动座椅、电动车窗及电动后视镜	203	11.5 新型卡车 CAN/LIN 电气系统网络 应用实例	271
5.7 汽车电喇叭系统组成	207	第 7 章 智能交通系统	275
第 6 章 汽车车上网络	209	1 智能交通系统概述	275
1 CAN 基本技术	209	1.1 智能交通系统产生及概念	275
1.1 CAN 技术规范 2.0A	209	1.2 智能交通系统体系框架	275
1.2 CAN 技术规范 2.0B	214	1.3 各国的智能交通系统	276
1.3 MAC 机制	216	1.4 智能交通系统的标准化	280
1.4 数据帧与 CAN 中断速率	217	1.5 智能交通系统应用的社会经济效益	282
1.5 总线长度与位速率	217	2 智能交通系统的主要组成部分	283
2 独立 CAN 控制器 SJA1000	217	2.1 先进交通信息系统	283
2.1 特性	217	2.2 先进交通管理系统	285
2.2 一般说明	218	2.3 先进车辆控制系统	286
2.3 框图	218	2.4 先进公共运输系统	288

2.5 商用车辆运营系统	289	7.7 导航系统	373
2.6 电子收费系统	289	7.8 再生制动系统	373
3 车辆定位导航系统及其定位技术	291	参考文献	375
3.1 概述	291	第2篇 轨道交通电气	377
3.2 车辆定位导航系统的组成	292	第1章 总论	379
3.3 车辆定位导航系统中的定位技术	292	1 轨道交通的基本概念	379
4 地图匹配技术	296	1.1 基本定义	379
4.1 地图匹配的原理	296	1.2 轨道交通的分类	380
4.2 误差区域的选择	296	1.3 轨道交通的特点	381
4.3 地图匹配的算法	297	2 轨道交通的技术发展	382
4.4 地图匹配算法的影响因素	299	2.1 牵引动力的发展	382
5 路径规划算法	300	2.2 牵引方式的发展	383
5.1 经典的最短路径规划算法	301	2.3 牵引供电方式的发展	383
5.2 启发式搜索算法	301	2.4 通信信号与信息化的发展	384
5.3 其他最优路径规划算法	302	3 轨道交通系统的组成	384
6 智能交通系统中的移动通信	302	3.1 运输装备	384
6.1 移动通信概述	302	3.2 牵引供电	387
6.2 移动通信的分类方法	303	3.3 通信与信号	388
6.3 移动通信在智能交通系统中的应用	303	3.4 运输管理信息化	389
6.4 卫星通信方式	304	第2章 牵引电气系统	391
6.5 专用短程通信技术	305	1 电气牵引基本概念及牵引计算	391
第8章 电动汽车	306	1.1 牵引基本概念	391
1 概述	306	1.2 牵引计算	394
1.1 关键技术	306	2 牵引电气系统构成	396
1.2 发展趋势	307	2.1 电力机车	396
1.3 国内外电动汽车标准	307	2.2 电动车组	405
2 纯电动汽车	309	2.3 电传动内燃机车	410
2.1 基本结构	309	2.4 电传动内燃动车组	413
2.2 行驶性能	312	2.5 城市轨道车辆	414
2.3 特征技术	319	3 主传动系统	419
2.4 中国纯电动汽车的研发进程	320	3.1 交一直传动系统	419
3 混合动力电动汽车	320	3.2 交流传动系统	424
3.1 基本结构	320	4 辅助电气系统	429
3.2 控制策略	322	4.1 旋转劈相机系统	429
3.3 混合动力电动汽车发展动态	325	4.2 辅助变流器系统	431
4 燃料电池电动汽车	330	4.3 其他辅助系统	432
4.1 基本结构	330	4.4 列车供电系统	432
4.2 燃料电池系统	331	5 控制系统	433
4.3 燃料电池电动汽车发展动态	332	5.1 控制系统的任务	433
5 电动机驱动系统	335	5.2 调速方法	433
5.1 电动汽车对驱动电动机的特性要求	335	5.3 功率因数补偿装置的控制	435
5.2 直流电动机	338	5.4 黏着及黏着利用控制	435
5.3 感应电动机	339	5.5 电力机车自动过分相	439
5.4 永磁电动机	344	5.6 控制系统发展的几个阶段	440
5.5 开关磁阻电动机	347	6 制动系统	440
6 能量源	350	6.1 空气制动	441
6.1 蓄电池	350	6.2 电制动	441
6.2 高速飞轮	358	6.3 联合制动	442
6.3 超级电容器	361	6.4 防滑控制	442
7 电动汽车的辅助系统	362	7 行车安全控制系统	443
7.1 蓄电池充电技术与充电器	362	7.1 基本概念	443
7.2 蓄电池的监测和管理	367	7.2 行车安全控制技术的发展	444
7.3 蓄电池的均衡管理	369	7.3 机车行车安全装备系统的构成	444
7.4 温度控制单元	371	7.4 监控装置的功能	445
7.5 动力转向系统	372	8 轨道交通机车车辆电气试验	447
7.6 辅助动力源	372		

8.1 试验分类和实施方式	447	9.4 防滑器及其控制	603
8.2 电力机车和动车的试验	448	第4章 客车电气设备	604
第3章 牵引电气设备	450	1 概述	604
1 牵引变压器	450	1.1 客车电气系统类型	604
1.1 技术等级分类	450	1.2 客车电气系统的供电方式	604
1.2 主要产品	450	2 25T 客车电气系统	605
1.3 基本原理及分类	452	2.1 25T 客车电气系统组成	605
1.4 变压器结构及主要部件	453	2.2 主要设备及功能	605
1.5 冷却系统	461	2.3 客车 DC600V 供电系统	606
1.6 试运行前检查项目	463	3 主要电气设备	608
2 牵引变流器	463	3.1 三相逆变电源	608
2.1 主要器件	464	3.2 客车充电机箱	611
2.2 直—直变流器	465	3.3 电气综合控制柜	614
2.3 交—直变流器	468	3.4 蓄电池组	617
2.4 中间直流环节	472	3.5 车端连接器	619
2.5 直—交变流器(牵引逆变器)	473	3.6 客车网络监控系统	621
2.6 传动控制单元	476	3.7 旅客信息系统和设备	623
2.7 冷却	486	3.8 安全监控设备	624
2.8 试验	489	3.9 客车通风、采暖与空气调节设备	628
3 牵引电动机	493	3.10 客车其他电气设备	630
3.1 牵引电动机技术性能	493	第5章 牵引供电系统与设备	631
3.2 同步牵引电动机	498	1 铁路干线牵引供电系统	631
3.3 直(脉)流牵引电动机	500	1.1 牵引供电系统	631
3.4 异步牵引电动机	507	1.2 干线牵引变电所	636
4 同步牵引发电机	515	1.3 接触网	644
4.1 同步牵引发电机的运用	516	2 城市轨道交通供电系统	652
4.2 主要参数	516	2.1 供电电源系统	652
4.3 同步牵引发电机的励磁	518	2.2 主变电所	653
4.4 设计特点	519	2.3 牵引变电所	656
4.5 结构	522	2.4 牵引变电所设备	657
4.6 试验	524	2.5 降压变电所设备	662
4.7 维护保养	526	2.6 牵引网	662
5 控制与网络	526	2.7 再生制动能量吸收装置	666
5.1 列车通信网络的基本任务和构成	526	2.8 杂散电流腐蚀防护与接地	667
5.2 国内外列车通信网络标准	527	2.9 电力监控系统	670
5.3 列车通信网络	528	2.10 供电计算分析	676
5.4 列车控制、诊断和显示	534	第6章 通信信号与信息技术	679
5.5 交—直传动电力机车的微机控制系统	538	1 概述	679
5.6 电传动内燃机车的微机控制系统	543	2 通信	679
5.7 控制电源及辅助电源	545	2.1 铁路通信系统	679
6 牵引电器	546	2.2 铁路综合数字移动通信系统 GSM-R	686
6.1 高压电器	546	2.3 城市轨道交通通信系统	689
6.2 低压电器	560	3 信号系统	698
7 辅助电气设备	567	3.1 干线铁路信号	698
7.1 辅助变流器	568	3.2 编组站自动化系统	713
7.2 辅助电动机	571	3.3 城市轨道交通信号系统	724
8 行车安全装备	574	4 信息技术	735
8.1 机车信号装置	574	4.1 铁路运输管理信息系统 TMIS	735
8.2 列车运行监控记录装置	578	4.2 TDCS	740
8.3 机车安全信息综合监测装置	583	4.3 铁路客票发售及预订系统	745
8.4 机车监测数据无线传输装置	591	4.4 综合自动化系统(综合监控系统, ISCS)	746
8.5 机车状态信息处理装置	595	第7章 磁浮交通系统	750
9 电气制动装置	598	1 概述	750
9.1 空气制动机	598	1.1 基本概念	750
9.2 电气制动	598	1.2 发展历程	750
9.3 联合制动装置	602	2 磁浮交通的分类与特征	751

2.1 分类 751

2.2 特征 751

3 磁浮列车 754

3.1 特点与分类 754

3.2 EMS 型磁浮列车悬浮导向系统 754

3.3 电动斥力型磁浮列车悬浮导向系统 757

3.4 磁浮列车驱动系统 759

3.5 磁浮列车制动系统 762

3.6 高低速 EMS 型磁浮列车悬浮、导向、
驱动特点比较 762

4 磁浮交通运行控制系统 763

4.1 组成 763

4.2 功能 764

4.3 中央控制系统 766

4.4 分区控制系统 768

4.5 车载控制系统 770

4.6 运行控制系统数据通信 770

5 磁浮交通牵引供电系统 771

5.1 分类 771

5.2 牵引原理 772

5.3 结构与功能 772

5.4 磁浮交通牵引供电系统的特点 772

5.5 主变电所供电系统 774

5.6 牵引系统 775

5.7 轨旁设备 779

6 线路工程 780

6.1 EMS 型高速磁浮铁路线路的主要特点 780

6.2 EMS 型高速磁浮铁路线路上部结构 780

6.3 EMS 型中低速磁浮线路构造的特点 786

6.4 EDS 型高速磁浮铁路线路的特点 787

第 8 章 电磁兼容 789

1 概述 789

2 电磁兼容的基本知识 789

2.1 定义 789

2.2 电磁兼容研究的基本内容 789

2.3 电磁干扰的三要素 789

2.4 电磁场理论基础 791

2.5 电偶极子的电磁辐射 791

2.6 磁偶极子的电磁辐射 792

2.7 近场区及远场区的特性 792

2.8 传输线基础 794

3 基本方法与手段 796

3.1 屏蔽 796

3.2 滤波 800

3.3 接地与搭接 802

4 设计要点 806

4.1 电磁环境要求 806

4.2 系统间电磁干扰的预测及控制 807

4.3 系统内电磁干扰的抑制及控制 811

4.4 印制电路板 (PCB) 的设计 812

5 试验 815

5.1 IEC 60571 及 TB/T 3021 标准 815

5.2 EN 50121 及 IEC 62236 标准 815

5.3 试验要求 817

5.4 试验方法 819

参考文献 826



第1篇 汽车电气

主编单位：哈尔滨工业大学

主 编：陈清泉 佟为明 程树康

编写人员：陈清泉（哈尔滨工业大学）

佟为明（哈尔滨工业大学）

程树康（哈尔滨工业大学）

逯仁贵（哈尔滨工业大学）

朱春波（哈尔滨工业大学）

宋立伟（哈尔滨工业大学）

侯云鹏（哈尔滨工业大学）

吴红星（哈尔滨工业大学）

刘晓芳（哈尔滨工业大学）

裴宇龙（哈尔滨工业大学）

刘洪臣（哈尔滨工业大学）

柴 凤（哈尔滨工业大学）

程 远（哈尔滨工业大学）

盖晓东（哈尔滨工业大学）

杨世彦（哈尔滨工业大学）

第1章 概 论

汽车电气工程的范畴包括汽车电器系统、汽车电子控制系统、汽车电子信息系统、智能交通系统和汽车车上网络五部分。本章阐述了各部分的组成与功能，重点是汽车电子控制系统，包括发动机电子控制系统、底盘或（道路）车辆电子控制系统、车身电子控制系统；介绍了汽车电气电子技术的发展历程、现状和发展趋势，以及汽车电气系统的特点。鉴于电动汽车、节能环保汽车的良好发展势头，对其发展现状、发展动态、特点及相关技术作了简要介绍。

1 汽车电气工程的概述

1.1 汽车电气工程的基本概念

汽车电气工程是研究作为机电一体化典型产品的现代汽车中与电有关的装置、设备、模块，系统的构造、组成，设计原理、特性、检测、使用维修的综合技术。汽车电气工程所涉及的理论与技术包括汽车构造、电工学（电路理论、电机技术、电器技术、电力电子技术）、电子技术、单片机（微处理器或微控制器、嵌入式系统）技术、检测与转换技术（或传感器技术）、数字信号处理技术、网络技术、现场总线技术、计算机（高级语言编程）技术、控制理论与技术、电磁兼容技术等。

1.2 汽车电气工程的范畴

以现代汽车作为一个物理实体，以对该实体各主要部分、系统及整体的运行、控制为出发点，汽车电气工程的范畴包括汽车电器系统、汽车电子控制系统、汽车电子信息系统、智能交通系统。汽车电器系统主要是指与汽车上电能的产生、供给、分配、保护、变换、使用、检测等有关的装置、设备和系统；汽车电子控制系统主要是指与汽车本体的性能密切相关（如提高汽车本体性能）的具有控制作用和功能的电子系统，它一般要与车上机械系统进行配合使用，即所谓“机电结合”的汽车电子系统；汽车电子信息系统或称车载汽车电子系统是在汽车环境下能独立使用的电子系统，主要是指与汽车本体的性能无直接关系或关系不大的起信息显示、传输等作用，以及能提供娱乐和办公等条件的电子或信息系统，它只要满足汽车的使用环境（电气环境、电磁环境、机械环境、气候环境、化学环境）要求即可安装使用；智能交通系统是为解决因汽车数量的急剧增加而导致的交通问题才产生的，它与汽车的使用者（驾驶员、乘客）及交通管理部门联系紧密，在技术上实现以电子技术、信息技术、通信技术为主。必须指出，对于现代汽车，特别是高档汽车，其在汽车电器系统、汽车电子控制系统、汽车电子信息系统中均采用了或正在采用汽车车上网络；而智能交通系统更是依赖于（通信）网络系统，包括安装于汽车上的网络设备、道路与停车场上的网络设备、交通管理部门中的网络设备，乃至太空中的网络设备（通信卫星）等。由于汽车车上网络在技术上是相对独立的，因此亦常常将它作为一个单独的部分来介绍。这样，在将汽车车上网络独立出来的情况下，汽车电气工程的范畴即包括了汽车电器系统、汽车电子

控制系统、汽车电子信息系统、智能交通系统和汽车车上网络五部分。从本质上讲，前四部分为具有独立功能的系统，后一部分主要作为贯穿于前四部分的技术，亦可能为某些部分或系统（如汽车电子信息系统、智能交通系统）的子系统。另外，为叙述方便起见，有时也将汽车车上网络这一部分作为一个系统来称呼、阐述，以便与其他四个系统相一致。

一般来说，汽车电气工程的范畴所包括的汽车电器系统、汽车电子控制系统可归为汽车电气系统；而汽车电子信息系统、智能交通系统和汽车车上网络可归为汽车电子系统。因此，总起来说，汽车电气工程的范畴所包括的五个部分或系统均可归为汽车电气电子系统，如图 1.1-1 所示。本章是按汽车电气电子系统和技术来展开介绍的。



图 1.1-1 汽车电气工程的范畴

在此指出，一般将汽车电机（系统）归为汽车电器系统，但考虑到汽车电机（系统）的特殊性，在下面亦单独简要介绍。

2 汽车电气电子系统的组成与功能

2.1 汽车电器系统的组成与功能

汽车电器系统的组成如图 1.1-2 所示。

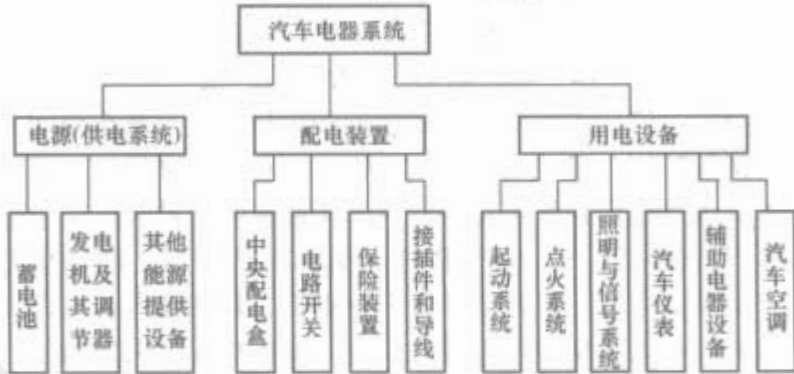


图 1.1-2 汽车电器系统的组成

多数汽车电源（供电系统）由蓄电池、发电机及其调节器组成。汽车电源的作用是向车上各用电设备和系统提供电能。蓄电池是汽车的辅助电源，发电机是汽车的主要电源，蓄电池与发电机并联。在发动机工作时，由发动机带动发电机向车上各用电设备和系统提供电能，并向蓄电池充电。蓄电池的主要作用是在起动发动机时（汽车起动时）向起动机

和点火系统（对于汽油发动机）提供电能，以及在发动机不工作时（如汽车停止时）向照明与信号系统等供电。发电机配有调节器，其主要作用是在发电机转速和负荷变化时调节发电机的电压，使之保持稳定，以使各用电设备、系统正常工作。随着现代科技的发展、石油（能源）危机的不断出现和加深、燃料消耗和废气排放法律限制的加强，在汽车上使用的能源种类也越来越多，如太阳能、氢能源等。因此，新型汽车（不含纯电动车）的能源除蓄电池、发电机外，还包括其他能源提供设备。这些能源的使用使得汽车的电源设备在不断增加，结构也在发生变化。

汽车配电装置的主要作用是分配电能、保护线路及设备，包括汽车配电盒、电路开关、保险装置、接插件和导线等。其中，汽车配电盒、接插件和导线起分配电能的作用，保险装置主要起保护作用，电路开关主要起分配电能的作用，也可能具有保护及控制作用。

汽车上的用电设备种类和数量很多。严格地讲，凡是使用电能的一切电气和电子设备均属于用电设备。但是，考虑到汽车电气电子的发展历史和现状，根据传统和习惯，一般只将那些消耗电能较多或功率较大的电器设备作为汽车电器系统的用电设备。据此，用电设备主要包括起动系统（起动系）、点火系统（点火系）、信号与照明系统、汽车仪表、辅助电器、汽车空调等。

起动系统主要指起动机，其作用是拖动发动机曲轴，实现汽车发动机的随时起动。起动机包括产生转矩的直流串励式电动机，起动时使起动机驱动齿轮啮入飞轮齿环、起动后使驱动齿轮自动打滑的传动机构，用来接通和切断电动机与蓄电池之间电路、控制起动机驱动齿轮与发动机飞轮啮合与分离的操纵装置、电磁开关、控制装置。

点火系统是汽车发动机所具有的，包括传统点火系统（即机械触点式点火系统或蓄电池点火系统）和电子点火系统，其作用是适时和准确地产生高电压，在火花塞电极间产生高压电火花（击穿火花塞间隙），从而点燃发动机气缸中的可燃混合气体，并实现发动机各气缸有序点火。传统点火系统包括电源（蓄电池和发电机）、点火开关、点火线圈、分电器、高压线和火花塞等。电子点火系统的种类较多，可按不同的方式分类，例如按点火能量的储存方式分类，电子点火系统可分为电容放电式电子点火系统和电感储能无触点式电子点火系统，其中电容放电式电子点火系统一般由直流升压器、储能电容、开关元件（晶闸管等）、触发器，以及点火线圈、分电器等组成；电感储能无触点式电子点火系统的基本组成包括点火信号发生器（传感器）、点火器（点火控制器）、点火线圈、分电器、高压阻尼线（高压线）及火花塞等。

照明与信号系统包括照明装置和信号装置。汽车照明装置包括前照灯（最为重要）、前小灯、尾灯、牌照灯、雾灯及车室内灯等，其作用是保证汽车能在夜间行驶或能见度低条件下行驶和工作。信号装置包括转向信号灯、制动信号灯、倒车信号灯、警告信号灯及电喇叭、蜂鸣器等，其作用是用来向行人和车辆发出警告信号，确保汽车的有效行驶。

汽车仪表包括电流表、电压表、机油压力表、水温表（温度表）、燃油表、车速里程表、发动机转速表和自检装置等，其作用是用来显示汽车行驶时各种运行工况参数，以便驾驶员正确驾驶车辆。

汽车辅助电器设备包括刮水器（电动刮水器电动机）、风窗玻璃洗涤器（风窗玻璃洗涤电动泵式喷水器）、后窗玻璃除霜器、电动摇窗机（玻璃升降电动机）、座椅调节电动机、低温起动电热塞、电磁喷油器和电加热器、空调器电磁

离合器和风机、音响设备、喇叭、防盗报警装置的报警喇叭、灯光装置以及点烟器、倒车雷达等，其作用是满足汽车的各种需要，提高其安全性、舒适性和实用性。为适应人们日益提高的对舒适、娱乐、安全保障的需要，汽车附属电器设备的数量和种类还在增加。

汽车空调主要由压缩机、加热器、热交换器、鼓风机、通风机、膨胀阀、管道及附件等组成，其作用是调节车内的温度和湿度，使其达到舒适的标准。

2.2 汽车电子控制系统的组成与功能

汽车电子控制系统包括发动机电子控制系统（engine electronic control system）、底盘电子控制系统（vehicle electronic control system）、车身电子控制系统（body electronic control system），如图 1.1-3 所示。在此指出，有些文献将发动机电子控制系统和传动系电子控制系统合在一起，称之为动力传动总成（powertrain）电子控制系统或动力总成电子控制系统或动力牵引电子控制系统。

各种汽车电子控制系统的具体组成和功能各不相同，但它们的基本结构均如图 1.1-4 所示。



图 1.1-3 汽车电子控制系统的组成



图 1.1-4 汽车电子控制系统的基本结构

2.2.1 发动机电子控制系统的组成与功能

2.2.1.1 汽油发动机电子控制系统

图 1.1-5 所示为汽油发动机电子控制系统的主要控制内容（如无特殊说明，以下所说的发动机即指汽油发动机）。

发动机电子控制系统通过对发动机燃料（燃油）喷射（engine fuel injection, EFI）的控制、点火（ignition）提前角的控制及爆燃（detonation）的控制、怠速时发动机曲轴转动频率的控制〔怠速转动频率的控制或怠速（idle speed）控制〕、排气再循环（exhaust gas recirculation, EGR）控制以及进行诊断等，可以使发动机工作在最佳状态，获得高功



图 1.1-5 汽油发动机电子控制系统的主要控制内容

率、大扭矩、低油耗、洁净的排气以及行驶稳定性。在这些控制中，发动机燃油喷射控制和点火提前角控制是核心，其他控制基本均可归于这两种控制。

国外部分公司发动机电子控制系统的发展及其功能见表 1.1-1，其中燃油多点喷射是相对于单点喷射而言的，是指在每一个气缸的进气门前均安装一个喷油器，将汽油直接喷射到各气缸的进气门附近并与空气混合形成混合气。点火正时是指点火适时而准确，即精确地控制点火提前角（点火时刻）。对于多点喷射系统，由于每一气缸均有一个喷油嘴，因此各气缸混合气的均匀性得到了很大改善。多点喷射系统是使用较多的喷射系统。

图 1.1-6 所示为某汽油发动机电子控制系统示意图，图 1.1-7 所示为丰田汽车发动机电子控制系统，而图 1.1-8 所示为电子控制单元框图。

(1) 燃油喷射控制。

1) 空燃比。发动机电子控制系统的最主要作用是对空燃比的调节，目的是获得最佳的空燃比，这主要是通过燃油喷射控制实现的。空燃比是指空气质量与燃料质量之比，即空气和燃料的混合比，通常用 A/F 表示。空燃比是一个最重要的发动机参数，因为它决定着发动机的动力性、经济性和排气洁净性，以及燃烧稳定性。

燃料要完全燃烧，理论上所需的空气量与燃料量之比称为理论空燃比，其值为 14.7~14.8（取决于不同产地和炼油法的汽油）。火焰燃烧速度越快，燃烧压力就越高，发动机的输出功率便越大。当空燃比比理论空燃比稍小（为 12~13）时，火焰燃烧速度最快，即发动机的输出功率最大。但是，耗油量最低时的空燃比比理论空燃比稍大，为 16 左右。由此可知，当要求大功率（节气门接近完全打开）时，需使空燃比比理论空燃比稍小；而当要求低油耗（发动机处在经济运行状态）时，则需使空燃比比理论空燃比稍大。另外，空燃比还与发动机的排气污染有关。

表 1.1-1 国外部分公司的发动机电子控制系统的发展及其功能

国别	公司名称	时间 (年)	系统名称	主 要 功 能
德 国	BOSCH	1967	D-Jetronic	燃油多点喷射
		1973	K-Jetronic	燃油多点喷射(机械控制)
		1973	L-Jetronic	燃油多点喷射
		1979	Motronic	燃油多点喷射、点火正时、怠速、排气再循环
		1981	LH-Jetronic	燃油多点喷射
		1982	KE-Jetronic	燃油多点喷射(机械电子控制)
		1986	Mono-Jetronic	燃油单点控制
美 国	通用	1979	EFI	燃油多点喷射、点火正时、怠速
		1980	DEFI(TBI)	燃油多点喷射、点火正时、怠速、排气再循环
	福特	1979	EEC-III(CFI)	燃油多点喷射、点火正时、怠速、排气再循环
		1982	EEC-IV	同 EEC-III，采用 16 位计算机控制
	克莱斯勒	1980	EFI	燃油多点喷射、点火正时、怠速、排气再循环
日 本	日产	1979	ECCS	燃油多点喷射、点火正时、怠速
	丰田	1980	TCCS	燃油多点喷射、点火正时、怠速、排气再循环
		1984	T-LCS	燃油多点喷射、点火正时、怠速、排气再循环，用于稀薄燃烧系统
	三菱	1980	ECS	燃油多点喷射、点火正时、怠速、排气再循环

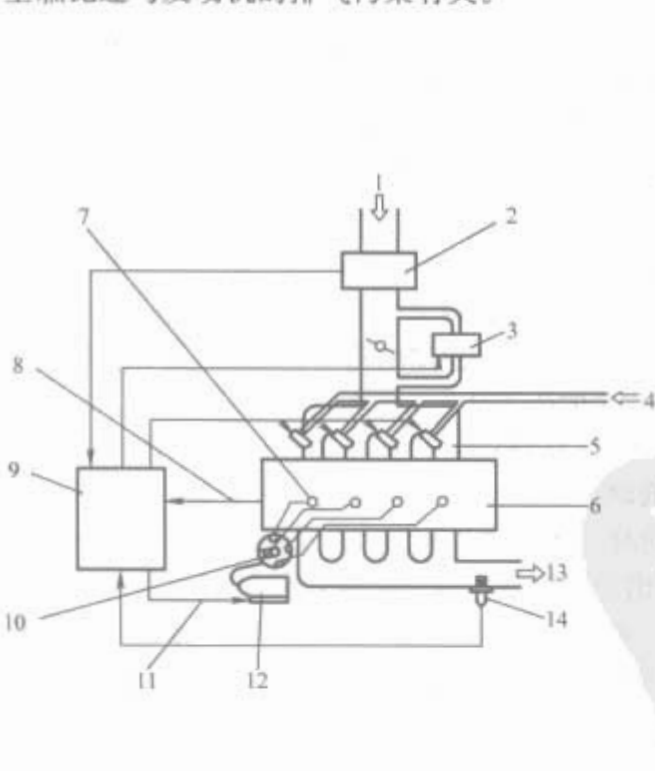


图 1.1-6 某汽油发动机电子控制系统示意图

1—空气；2—空气消耗量传感器；3—控制曲轴在怠速时转动频率的执行装置；4—燃料；5—喷油嘴（喷油器）；6—发动机；7—火花塞；8—发动机曲轴转动频率；9—电子控制单元；10—点火分配器（分电器）；11—输出信号；12—点火线圈；13—废气；14—氧传感器

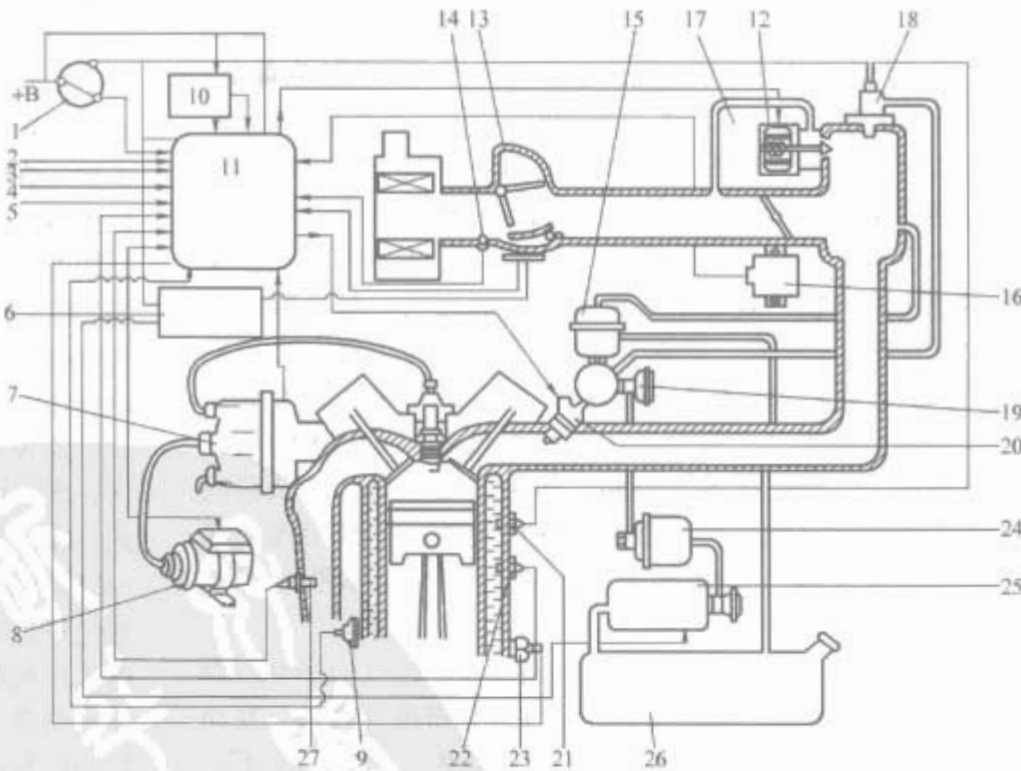


图 1.1-7 丰田汽车发动机电子控制系统

1—点火钥匙（开关）；2—用于接通外部诊断设备的接头；3—中立传动装置的接通信号；4—空调器接通信号；5—汽车速度传感器；6—动合继电器；7—点火分配器；8—点火线圈；9—油压事故下降传感器；10—继电器；11—电子控制单元；12—怠速时曲轴转动频率控制系统的步进电动机；13—空气消耗量传感器；14—进入发动机的空气温度传感器；15—压力调节器；16—节气门开启角度传感器；17—怠速阀；18—冷起动喷油嘴；19—减压阀；20—喷油嘴；21—预热定时器；22—冷却液温度传感器；23—爆燃传感器；24—燃油过滤器；25—燃油泵；26—燃油箱；27—氧传感器

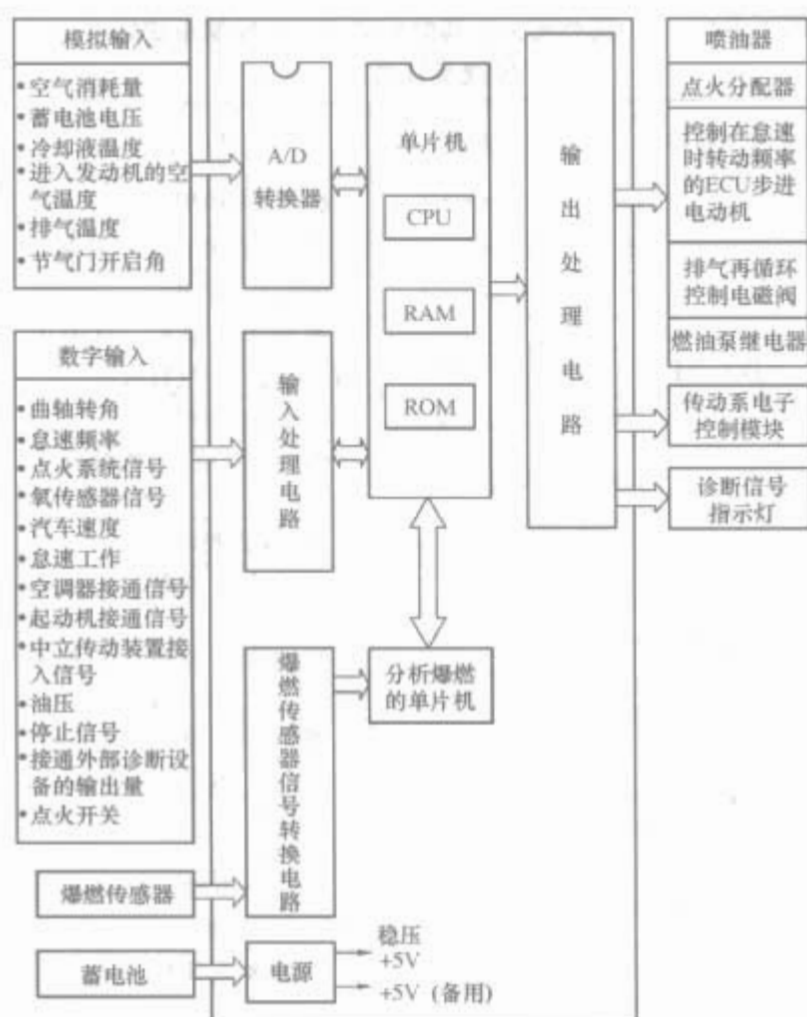


图 1.1-8 发动机电子控制单元框图示例

在发动机排出的气体中主要包含 N_2 、 CO_2 、 H_2O ，还混有少量因不完全燃烧而产生的 CO 和碳氢化合物，以及高温废气中所产生的 NO_x [氮的氧化物，包括 NO (较多) 和 NO_2 (较少)] 等。这些物质都是大气污染物质。空燃比在 16 以上时， CO 的浓度很小，且变化甚微；而空燃比在 16 以下时， CO 的浓度便急剧增加。所以，只要燃烧稳定，并使空燃比保持在 16 以上，就能将 CO 的排放量控制在最小范围内。碳氢化合物的排放浓度在空燃比约等于 17 时为最低；在空燃比大于或小于 17 时，碳氢化合物的排放浓度均增加。当气缸内混合气的空燃比在 16 左右时， NO 的排放量最多；比之更浓或更淡的混合气中， NO 的排放量均迅速减少。

还应指出，在 $1/4$ 负荷以下的轻负荷区，燃烧容易变得不稳定。为使燃烧稳定，需要加浓混合气，怠速时将空燃比修正在 12 左右。冷起动时，汽油难以气化，为了向火花塞电极间隙处供给易燃混合气，必须尽量加浓混合气，即减小空燃比。可见，在各种工况下，空燃比的调整对燃烧稳定性也是至关重要的。如果燃烧不稳定，就会损害驱动力的稳定性，从而影响行驶稳定性，导致出现怠速不稳、过度失速、车辆摇晃、加速迟滞、功率波动、失速、回火等现象。

因此，为使发动机的动力性、经济性、排气洁净性、燃烧稳定性（特别是在怠速时）和起动性等获得最佳效果，发动机电子控制系统随时调整着发动机的空燃比，使之等于最佳值。

2) 燃油喷射控制所需传感器信号。发动机电子控制系统根据所需的各传感器信号，计算出可获得燃烧混合物中最佳空燃比的喷射燃油量。

① 喷射时间。喷射燃油量是由喷油器中电磁阀的开启时间决定的，即由喷油器外加脉冲电压的脉冲宽度（时间）所决定。喷油控制信号就是指具有一定宽度的脉冲信号。电磁阀的开启时间即喷射时间为基本喷射时间乘以修正系数，再

加上对电源电压变化的喷射时间修正值。其中，基本喷射时间是一个与产生理论上所必需的空燃比所要求的燃油量相符的时间，此时在一个循环内进入发动机的空气质量是根据空气消耗量传感器和发动机曲轴转动频率的数据计算出来的；对电源电压变化的喷射时间修正值这一因素的存在是考虑到电磁喷油器的动作时间是随电源电压的变化而变化的，即电源电压越高，电磁喷油器的动作时间越短；修正系数与多个因素有关。

② 与修正系数有关的因素。

a. 考虑预热时间的修正。为了改善冬天冷发动机的性能，根据冷却液温度传感器的信号，喷射燃油数量增加。在预热完成后，该修正值减小。

b. 发动机起动后的修正。通过该修正，发动机直接起动后曲轴的转动频率是稳定的。在起动后经过一定时间，该修正值减小。

c. 为增加发动机在预热时接收性的修正。为了增加发动机在预热时的接收性，修正系数随冷却液温度的增加而减少。

d. 防止过热修正。在最大功率状态下运行时，为避免发动机、中和器和汽车其他部件过热，必须使燃料混合物富油。为此，引入一个依赖于空气消耗量传感器信号、曲轴转动频率和其他因素的专用喷射时间修正值。

e. 考虑吸入空气温度的修正。因为空气的密度是随其温度的变化而变化的，所以引入一个修正值：吸入空气温度越低，该修正值越大。

f. 用负反馈方法的空燃比的修正。三元中和器可对排气中的 CO 、碳氢化合物和 NO_x 这三种成分同时净化。三元中和器由铂（或钯）和铈的混合物作为催化剂，以排气中的 NO_x 、 O_2 作为氧化剂，以 CO 、碳氢化合物和 H_2 作为还原剂，通过发生化学反应，使 CO 、碳氢化合物和 NO_x 转化为无害物质： N_2 、 CO_2 和 H_2O 。

只有当发动机混合气的浓度在理论空燃比 14.7 附近时，三元中和器的转化效果最佳。因此，必须对空燃比进行精确的控制，以使空燃比保持在理论空燃比附近很窄的范围内。而仅凭由空气消耗量传感器测得的进气量信号达不到对空燃比进行精确控制的目的。将安装在排气管内的氧传感器的输出信号作为反馈信号，构成一个负反馈闭环控制系统，可对空燃比进行精确的控制。因为氧传感器的输出电压在理论空燃比前后发生跃变，控制系统即可根据氧传感器的输出电压将空燃比控制在理论空燃比附近很窄的范围内。

这种空燃比负反馈控制只有在氧传感器工作时才能进行。当温度低时，氧传感器的输出电压（电动势）很低。因此，在冷起动时、在预热结束前，以及在氧传感器发生异常（氧传感器输出的表征混合气过浓或过稀的信号持续时间超过规定值，如 6.4s 或 10s）时，不利用氧传感器，而是由电子控制模块确定一个空燃比。另外，在停油状态，在高速和大负荷工况下（为了获得额定功率而需使混合气较浓），在起动后发动机转速在 50r/min 附近时，亦不进行空燃比负反馈控制。

③ 燃油供给中止。在下列情况下，应中止燃油供给。

a. 速度降低时中止燃油供给。当发动机转动频率高而节气门完全关闭时，在强制怠速下依靠中止燃油喷射来提高燃油的经济性。当发动机曲轴转动频率下降到低于给定值时，恢复燃油供给。

b. 转动频率高时中止燃油供给。为了防止因曲轴转动频率过高而损坏发动机，当转动频率刚一超过给定值时就中

止燃油喷射。

c. 发动机起动时的燃油喷射。在发动机起动时,燃油喷射量(喷射时间)是给定的,由冷却液温度决定。

d. 燃烧物喷射系统。在多缸汽车发动机中,主要应用同步喷射系统。在这种系统中,对所有的气缸均是在曲轴转动一周内进行一次燃油供给。例如,对于6缸发动机,在曲轴转角为 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的某一角度时,可同时对所有6个气缸进行一次燃油喷射。上面所说的由基本喷射时间和各种修正值所决定的喷射时间即是指同步喷射时间。在大多数工况下(如发动机起动或汽车正常行驶),燃油喷射是同步实现的。但是在汽车加速时,在同步喷射的同时,还要进行非同步喷射,以提高发动机的功率。此外,还存在单缸或2~3缸一组的独立喷射系统。

e. 燃油泵控制。当点火开关接通时,电子控制单元将使燃油泵工作2~3s,以建立所需的油压。若此时发动机不起动,电子控制单元会使燃油泵停止工作。在发动机起动过程和运转过程中,电子控制单元均控制燃油泵正常运转。

f. 传感器与执行器。在发动机电子控制系统中,用于燃油喷射控制的传感器主要有空气消耗量传感器(空气流量计)、曲轴旋转角度传感器、冷却液温度传感器、空气温度传感器、节气门开启角度传感器、氧传感器、汽车速度传感器;相应的各种开关量(数字量)传感器或信号发生器。用于燃油喷射控制的执行器主要有喷油器(电磁阀)及冷起动喷油器、控制燃油泵电源的动合继电器、预热定时器。

(2) 点火提前角的控制。点火时刻过早(点火提前角过大),燃烧废气最高温度上升,使 NO_x 的生成量增加,即 NO_x 的排放量增加;同时,燃烧废气的有效膨胀率提高,在膨胀行程后期气体温度降低,在燃烧结束后的膨胀后期残留在气缸壁面上的混合气燃烧不充分,使碳氢化合物的浓度提高。另外,点火时刻过早还使气缸内最高压力增大,噪声加剧,严重时还可能产生爆燃。可见,推迟点火对减少碳氢化合物和 NO_x 的排放量及防止爆燃是有利的。

但是,点火时刻过迟(点火提前角过小),使气缸循环的等容度变小,导致发动机输出功率和热效率降低,经济性变差。因此,必须在最合适的时刻点火,即必须对点火提前角进行控制。此外,在点火提前角的控制中,还要考虑到排气再循环等因素。

发动机电子控制系统对点火提前角控制的目的,就是在不同的发动机曲轴转动频率和发动机负荷等条件下,计算出最佳点火提前角并将控制信号送给点火线圈,使发动机能发出最大的功率或转矩,而将油耗和排放污染降低到最低限度。

1) 点火提前角的确定。点火提前角等于基本点火提前角加上点火提前角的修正值。

①基本点火提前角。怠速时基本点火提前角与发动机曲轴转动频率之间有一定的关系;为了保证工作稳定性,在转速一定时,该角度是一定的。在运动时,最佳点火提前角根据发动机的转动频率和所消耗的空气量来确定。

②点火提前角的修正值。

a. 冷起动时点火提前角的修正值。起动后,当发动机还没热透时,为了改善发动机的牵引性能,点火提前角应是变化的:点火提前角随冷却液温度的升高而减小;当冷却液温度升高到 60°C 左右时,点火提前角的修正值降为零。

b. 高温时点火提前角的修正值。如果发动机的温度很高,点火应更推迟。例如,当发动机的温度升高到 90°C 以上时,点火提前角的修正值应为负值。

2) 点火分配器的控制信号。为了保证在电子控制单元计算出的时刻进行点火,电子控制单元将通过点火线圈电流的起始和结束的控制信号送给点火系统的分配器。电流通过点火线圈的结束时刻就是点火时刻。

3) 传感器与执行器。在发动机电子控制系统中,用于点火提前角控制的传感器主要有曲轴旋转角度传感器、空气消耗量传感器(空气流量计)、冷却液温度传感器、节气门开启角度传感器。

用于点火提前角控制的执行器就是点火分配器。根据来自电子控制单元的点火信号,点火分配器的输出晶体管接通和切断点火线圈初级绕组中流过的电流,使次级绕组中产生高压。图1.1-9所示为点火系统的框图,包括点火线圈、分配器等。

在点火分配器中有这样一个电路,它根据送给分配器输入端的控制信号,给出输出晶体管的导通时间。此外,诊断电路(图1.1-9中未画出)通过判定在接通和切断点火线圈初级绕组的电流时产生的反电动势的大小,将关于点火系统是否工作正常的信息通报给发动机的电子控制单元。在点火分配器的工作遭到破坏时,为避免烧毁中和器,电子控制单元停止燃油喷射。

(3) 爆燃的控制。爆燃的控制可归于点火提前角的控制。但因爆燃的检测与控制有其特殊性和复杂性,故将爆燃的控制单独加以阐述;在图1.1-8中,亦有一个专用的单片机用于分析爆燃。

1) 爆燃的产生及其危害。爆燃是因燃烧室内的末端混合气被压缩点燃而引起的一种异常燃烧现象。爆燃的产生原因是,当火焰传播时,末端混合气被高度压缩而发热,加之还吸收来自火焰面的热量,从而使末端混合气几乎在瞬间着火燃烧,使压力急剧上升。仅有轻微爆燃发生时,等容度变大,膨胀功可充分得到利用,输出功率和热效率均有所提高。但当剧烈的爆燃发生时,由于末端混合气在瞬间燃烧,压力和温度急剧升高,产生高频压力波,从而破坏了燃烧室壁的激冷层(该层起着隔热膜的作用),导致散热量增加,各部分的温度上升。其结果是,活塞烧结、活塞环黏着、轴承破坏和气门烧蚀等,而且还因散热增加而使输出功率下降。可以说,剧烈的爆燃十分有害。爆燃是汽油的缺点之一,通常用辛烷值来表示汽油的抗爆性。正常燃烧的火焰传播速度是每秒几十米,但在爆燃时,其速度高达 1000m/s ,可产生 3kHz 以上的高频压力波,产生尖锐的敲缸声,导致气缸体发生振动。爆燃传感器就是基于对气缸振动频率和幅度的检测来探测爆燃的。

2) 爆燃与点火时刻。点火过早(点火提前角过大)时,



图 1.1-9 点火系统框图

由于上止点附近的压力升高率增大,使末端混合气的压缩压力上升,使得爆燃更易发生;相反,推迟点火(减小点火提前角)是避免爆燃发生的最有效手段。

3) 爆燃控制的目 的及方法。爆燃控制的目的是,保证点火提前角工作在临界值,以尽量提高发动机的功率、效率,同时又不至于引起爆燃,并可利用各种辛烷值的燃油。控制的方法是,安装在气缸中的爆燃传感器识别在爆燃时出现的振动,并将相应的信号送给电子控制单元;电子控制单元对该信号进行处理后,根据爆燃的程度,产生一个改变点火提前角的指令。

4) 爆燃控制的实现。通常,对爆燃的控制是按图 1.1-10 所示的框图进行的。

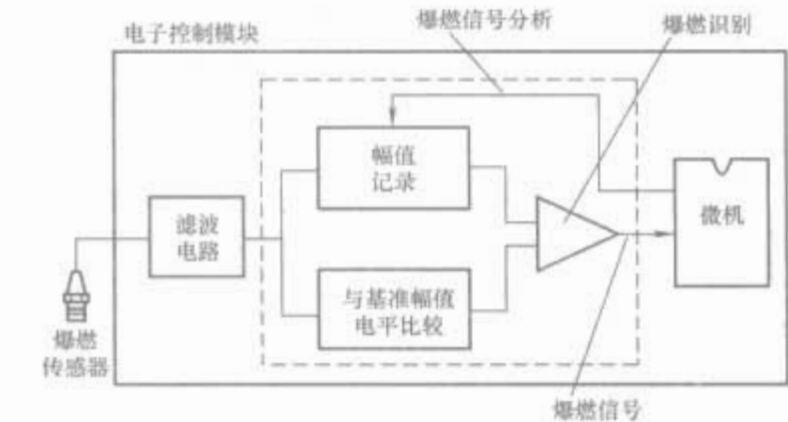


图 1.1-10 爆燃控制系统框图示例

① 滤波电路的作用。在发生爆燃时,在一个特有的频段内会出现一个幅度很高的成分。借助于带通滤波器即图 1.1-11 中的滤波电路将这一频段的成分分离出来,就可以得到识别爆燃的信号。

② 爆燃的识别。爆燃的识别是通过将当前信号与点火后一定时间内记录下来的没有爆燃时的传感器信号平均值相比较(相减)来进行的。通过统计幅值超过爆燃开始时所特有的基准值的波形数来确定爆燃程度。图 1.1-11 所示为说明爆燃控制系统工作的时间波形图。

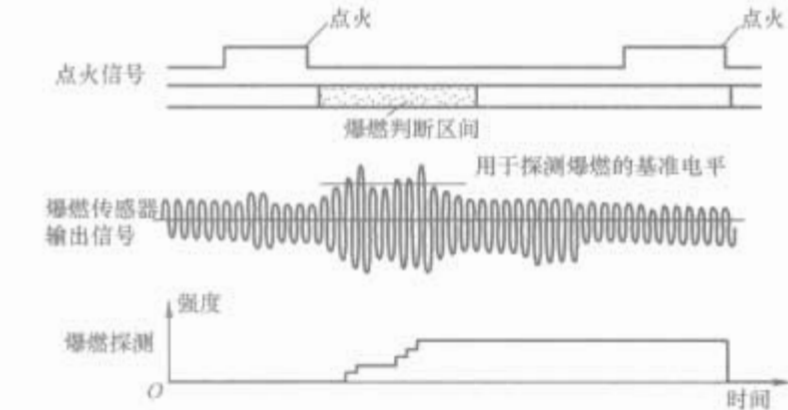


图 1.1-11 爆燃控制器的时间波形图

③ 爆燃的控制和点火调整。爆燃的控制是依据在识别爆燃过程的结果中得到的关于爆燃程度的信息来实现的。在识别出爆燃后,立即根据爆燃程度减小点火提前角。若此后爆燃不存在了,则点火提前角一步一步地增加,即点火提前角的控制是这样进行的:使点火提前角接近爆燃临界值。图 1.1-12 所示为点火提前角的变化。

(4) 怠速控制。怠速是指离合器分离,发动机不熄火地运转,汽车处于停止不动的状态。此时,节气门开度最小,喷油量最少。怠速转速越高,燃烧越稳定,但油耗也越高。因此,在不损害行驶性的前提下,希望保持低怠速。

通常,在发动机运转时,进气量取决于驾驶员踩加速踏板。喷油装置则按与进气量相匹配的原则增减喷油量,调节空燃比。但在怠速时,驾驶员的脚是离开加速踏板

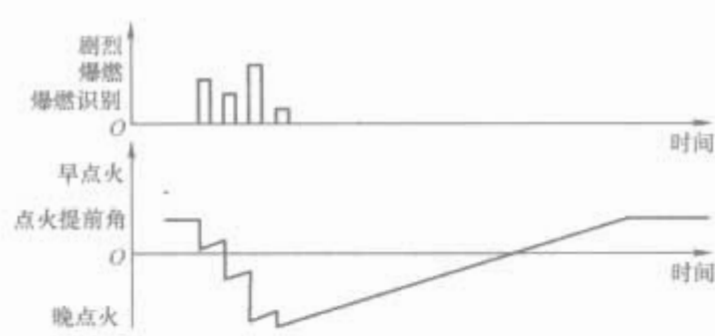


图 1.1-12 爆燃控制的时间波形和点火提前角的调整

的,必须由喷油装置决定所需的最少的进气量。况且,这种微妙的调整驾驶员是做不到的。为此,设有怠速控制装置,通过控制节气门旁的旁通进气道的进气量来调节怠速转速(称为旁通空气式控制);或通过直接控制节气门开度、调节空气通路的截面,达到控制进气量,从而实现怠速控制(称为节气门直动式控制)。

汽车在交通密度大的道路上行驶时,约有 30% 的燃油消耗在怠速工况。因此,发动机怠速转速的高低,不但对油耗有严重的影响,对发动机的排放污染、预热时间和使用寿命等均有一定程度的影响。另外,怠速的控制还要考虑各种条件或工况,如起动时、预热时、预热后,空调器及其他电器负载、自动传动系(自动变速器)等是否接通等。

怠速控制的目的在于,在各种条件或工况下,通过对怠速时进气量的控制,获得合适的空燃比,保持怠速时发动机曲轴处于最佳转动频率;同时,提高燃油的经济性。

以旁通空气式控制为例,借助于怠速频率控制阀,来调节节气门旁的旁通进气道的空气量,如图 1.1-13 所示。其中,怠速频率控制阀是由电子控制单元控制的步进电动机来驱动的。

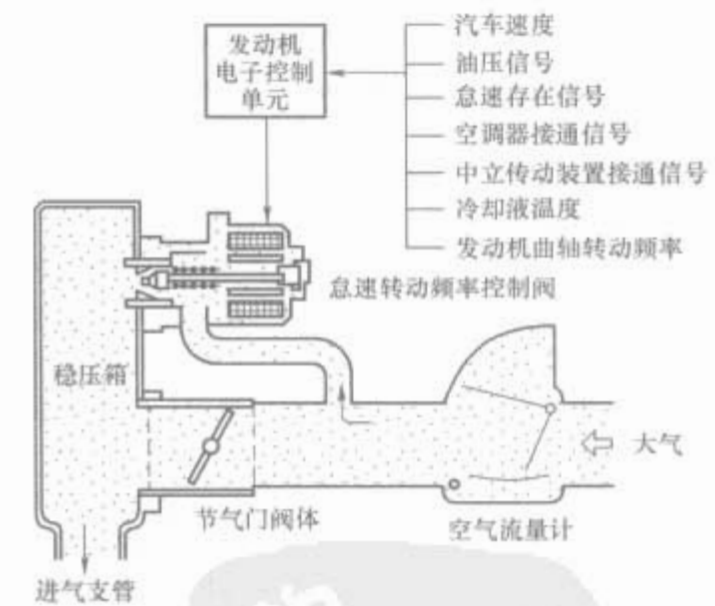


图 1.1-13 怠速转动频率控制系统示例

① 发动机起动时的控制。当通过旁通进气道的空气量达到最大值时,发动机的起动性能会得到改善。起动后,通过旁通进气道的空气的消耗量根据冷却液的温度进行调节。

② 发动机预热时的控制。在发动机起动时的频率控制状态结束后,即开始预热状态。随着冷却液温度的逐渐提高,逐渐增加空气的消耗量,以使在怠速时每一个预热阶段都达到曲轴转动的最佳频率。

③ 发动机预热后的控制。预热后,发动机的负荷明显升起来。为此,要分析自动传动系的工作状态、空调器的接通等。根据这些信息,电子控制单元计算出所需的怠速频率。为了达到这个频率,要进行带有负反馈的控制,以减小

计算频率和实际频率之间的差值。在怠速负荷迅速变化时(自动传动系的工作状态发生变化、空调器接通等),为了防止频率急剧降低,甚至发动机停转,在电子控制单元收到关于这些变化的信号后,怠速频率控制阀应立即开始动作,从而保证怠速时曲轴转动频率的稳定。

在发动机电子控制系统中,怠速控制所用的传感器(见图1.1-8和图1.1-13)主要有空气消耗量传感器(空气流量计)、曲轴旋转角度传感器、冷却液温度传感器、汽车速度传感器、油压传感器、怠速工作开关(怠速开关)、空调器接通开关、中立传动装置接通开关(空挡位置开关)。

在所给的例子中,怠速控制用的执行装置为由步进电动机驱动的怠速频率控制阀。该阀通过轴向移动来改变流量孔的面积,从而对空气消耗量进行调节。这种移动是由步进电动机驱动的螺旋机构来完成的。步进电动机根据来自电子控制单元的脉冲数进行转动。

(5) 排气再循环(EGR)控制。

1) 排气再循环及排气再循环抑制 NO_x 生成的原因。排气再循环是在发动机工作过程中,使一部分排气流回进气侧,与新鲜空气或混合气混合进入燃烧室,以抑制发动机内 NO_x 生成的一种手段。它作为排气净化对策而被广泛地采用。

排气再循环能抑制 NO_x 生成的原因是:首先,与只含有空气中氮气的新鲜混合气相比,排气再循环增加了单位燃料所对应的惰性气体量。这对于燃烧室内所产生的燃烧热能来说,废气的热容量相对增加了,故能有效地抑制废气温度的升高。其次,由于惰性气体增加,使着火延迟期(从产生电火花开始到混合气活跃地燃烧所需的时间)变长,燃烧速度变慢,因此燃烧温度的最大值随之下降。而燃烧温度的最大值越低, NO_x 的生成量也越少,所以排气再循环能抑制 NO_x 的生成。

2) 排气再循环的控制。排气再循环的控制指标用排气再循环率表示,排气再循环率为排气再循环量占整个燃烧混合气量(包括排气再循环量和新鲜空气进气量)的百分比。随着排气再循环率的增加, NO_x 急剧减少,如排气再循环率为15%时, NO_x 减少60%。但是,随着排气再循环率的增加,缺火严重,燃烧变得不稳定,导致油耗增加、扭矩减小,故排气再循环量的增加是有限度的。因此,当燃烧恶化时,必须减小排气再循环率,甚至完全停止排气再循环。排气再循环控制的目的,就是通过调节排气再循环率(排气再循环量),尽可能地抑制 NO_x 的生成、较少排气污染,同时保持燃烧稳定,并借助所确定的最佳点火时刻(最佳点火提前角),提高燃油的经济性。能够达到这些目的的依据是,随着工作气体热容量的增加,理论热效率得到提高;同时,通过提高汽油的辛烷值,可以使点火时刻提前(点火提前角增大),从而改善循环的等容度;此外,即使在相同负荷下,由于进气真空度下降,热损失也随之减少。

排气再循环率(排气再循环量)的调节是通过控制排气再循环控制(电磁)阀(排气再循环阀)的开度实现的。

排气再循环量的基本值与发动机转速及基本喷油量相对应。在低速、低负荷(喷油量少)的区域,由于燃烧易变得不稳定,故宜降低排气再循环率;在高速、高负荷(喷油量大)的区域,为了获得额定输出功率,也应降低排气再循环率。在发动机起动时(点火开关在“起动”位置)、在怠速(节气门怠速开关接通)和减速时、在发动机冷却液温度小于 35°C 和高于 100°C 时,特别是在燃烧不稳定的情况下,要

降低排气再循环率。由于发动机在冷态时燃烧不稳定,因此在冷却液温度低于一定值 T [T 与发动机起动时的冷却液温度有关,如发动机起动时的冷却液温度为 $(-10.5\sim 10)^\circ\text{C}$, T 为 $35\sim 70^\circ\text{C}$]时,不进行排气再循环。在节气门怠速开关从“接通”到“断开”的瞬间(开始踩加速踏板的时刻),因排气回流滞后,在从接通到断开后约0.2s内,应加大排气再循环控制阀的开度。

(6) 诊断功能。诊断就是电子控制单元判断、存储、在显示器上反映汽车运行时发动机电子控制系统的各部件(传感器、执行装置和接线)中出现的与标准不同的偏差。这些动作的完成,减轻了汽车中各种故障和缺陷的检查。

当来自任何一个传感器的送给电子控制单元的信号值,或者来自不同传感器的信号总和与所要求的值不同时,微机就会分析出这种状况。结果,就可判明传感器和执行装置的缺陷、断线和短路。这些数据被送到存储器中,并同时接通相应的给驾驶员告警的指示器。在现代高档汽车中,这些诊断信息还可通过通信接口送给外部设备。

(7) 电子控制单元。电子控制单元框图如图1.1-8所示。模拟信号借助于A/D转换器转换成数字信号(单片机只能接收数字信号);数字信号通过输入信号处理电路进入单片机(主单片机)的输入端;爆燃传感器信号由专用的单片机处理,然后送给主单片机。根据输入信号,主单片机计算出对于发动机给定状态下的最佳的喷油量、点火提前角、怠速时曲轴的转动频率、排气再循环率,以及其他参数。然后,控制信号经过输出信号处理电路,作用于喷油器、点火分配器、怠速频率控制阀、排气再循环控制阀等。

在电子控制单元的各部件中,数字信号输入处理电路、输出处理电路和电源电路或其作用是有一定的特殊性的。下面对此进行简要介绍。

① 数字信号输入处理电路的作用。虽然单片机接收的是数字信号,但大部分输入数字信号不能以原有的形式输入进单片机。大多数单片机是靠电子控制单元中的+5V稳压电源来工作的,而进入电子控制单元输入端的来自传感器和开关的信号通常如图1.1-14所给出的那样,即超过允许电压、交变极性、含有干扰和噪声、含有尖峰电压等。数字信号输入处理电路的作用就是将这些信号转换成可以输入单片机的信号:单极性的幅值不超过+5V的没有干扰和噪声的

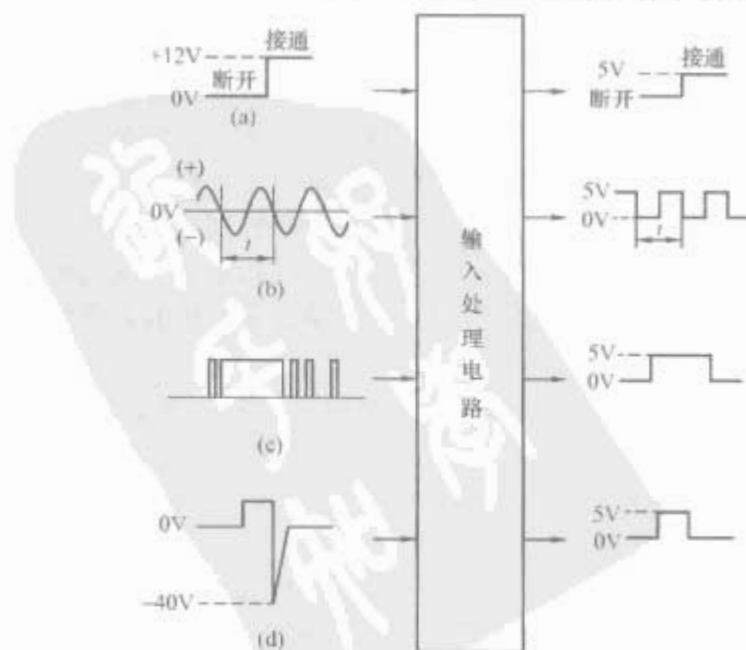


图 1.1-14 数字信号的输入处理
(a)电压跃变;(b)正、负交变电压;
(c)存在干扰;(d)电压尖峰

数字信号。

② 输出处理电路。因为大多数执行装置都是利用汽车上的蓄电池作为电源的，它们不能根据靠+5V电源工作的单片机的输出信号的作用而直接动作，因此为了使执行装置动作，必须要有一个靠单片机的输出信号而能直接动作的输出处理电路。图 1.1-15 所示为送给燃油喷射控制系统喷油器的信号输出处理电路。

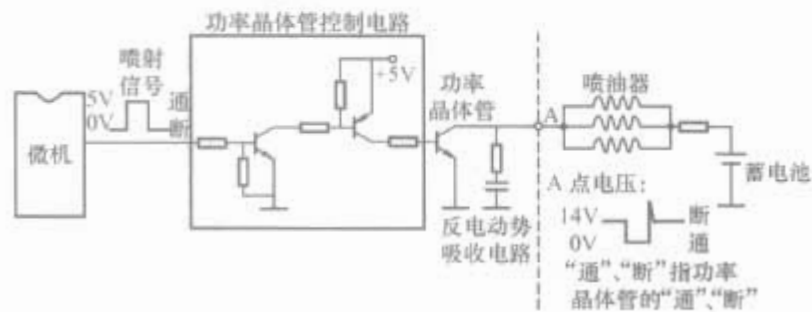


图 1.1-15 喷油器工作控制电路
(右下为送给喷油器的电压信号)

③ 电源电路。因为单片机和相关的外围装置均需要+5V电压，所以在电子控制单元中应具有提供该电压的电源。同时，汽车的蓄电池就是外电源。

如图 1.1-16 所示，在发动机起动时，车上电网电压是急剧振动的。因此，电源电路设计时应保证在电网电压急剧振动时，+5V 电源电压能够稳定。

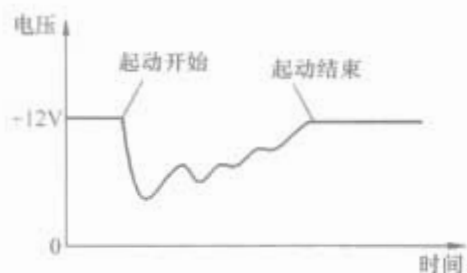


图 1.1-16 发动机起动时车上
电网电压的变化

此外，在传感器、执行装置等的工作能力检测完毕后，要使有关被判明的故障的信息保留下来，并且在点火开关断开的情况下，+5V 电源电压要送给存储器。但是，由于在这种情况下放电总是发生的，为避免蓄电池过量放电，在设计电路时，要特别注意电路所消耗的电流。

2.2.1.2 柴油发动机电子控制系统

柴油机具有省油的长处，但因其燃烧压力高、构造牢固，故难于高速化。而且，柴油机还存在振动与噪声大、比功率低和冒烟等缺点，因此 20 世纪 80 年代以前，柴油机主要广泛用于注重燃料经济性的大型载货汽车和公共汽车，很少用于轿车。较之汽油发动机，柴油发动机电子控制系统的发展较慢，因为与传统控制系统相比，电子控制系统必须使用大量传感器和结构复杂的执行装置，这使得整个系统的价格大大增加。但是，能源危机以后，对柴油发动机的需求增加了。

图 1.1-17 所示为一种柴油发动机电子控制系统示意图。该系统是从机械系统改成电子系统的。从图 1.1-17 可以看出，由于高压燃油泵是以机械原理进行工作的，该系统与汽油发动机电子控制系统的差别还是很大的。

图 1.1-18 所示为丰田汽车柴油发动机电子控制系统，图 1.1-19 所示为柴油发动机电子控制单元框图。

柴油发动机电子控制系统用于减少排气中有毒物质的含量，特别是解决柴油机所固有的一些问题，如减小烟度、振动、噪声，怠速时转动频率的最优化和稳定等。

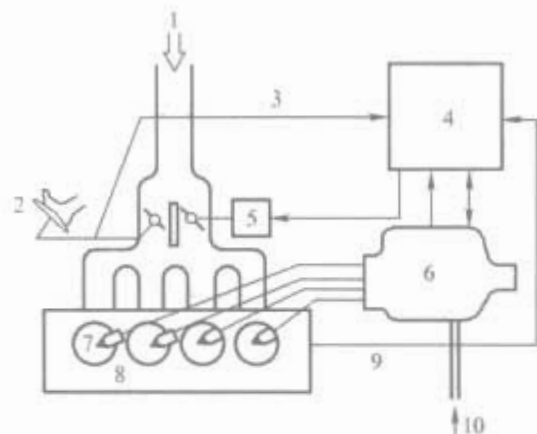


图 1.1-17 一种柴油发动机电子控制
系统示意图

1—空气；2—节气门打开传感器；3—节气门开度；4—电子控制单元；5—执行装置；6—高压燃油泵；7—喷油器；8—发动机；9—发动机曲轴转动频率；10—燃料

控制的方法是，在电子控制单元中处理以各种传感器信号形式送来的发动机的状态信息，电子控制单元将保证最佳燃油量和喷射时刻的控制信号送给燃油泵，并控制火花塞的电流。

在图 1.1-18 中，利用了高压燃油泵。

(1) 喷射燃烧物数量的控制。电子控制单元根据发动机曲轴转动频率和加速器踏板的位置，决定喷射燃油的基本数量，然后根据进入发动机的空气压力和温度传感器、冷却液温度传感器等信号，计算对该量的修正值。这样，就可得到燃油喷射的最佳数量。

(2) 燃油喷射起始时刻的控制。通常根据加速器踏板转角传感器、进入发动机的空气压力传感器等的信号，计算最佳的喷射起始时刻。但在图 1.1-18 中，根据安装在燃烧室里的点火传感器信号，电子控制单元保证记录的点火时刻与计算出的相一致。燃油喷射起始时刻的控制是通过专用控制阀进行的。

(3) 空气节气门（阻风门）的控制。在进气管的空气道中，安装了一个与汽油发动机节气门相似的阻风门。由于电子控制单元对阻风门的控制，减少了怠速时的振动，且在发动机停转时振动得以消除。此外，在控制系统失效时，阻风

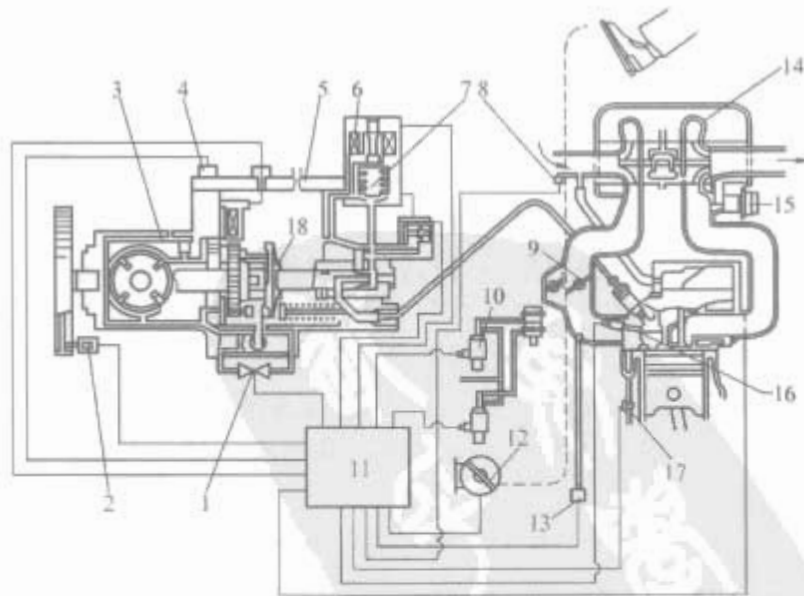


图 1.1-18 丰田汽车柴油发动机电子控制系统

1—专用控制阀；2—曲轴转角传感器；3—燃油入口；4—校正电阻；5—燃油出口；6—电磁导移阀；7—电磁阀；8—进入发动机的空气温度传感器；9—空气节气门（阻风门）；10—真空开关阀；11—电子控制单元；12—加速器踏板打开信号；13—进入发动机的空气压力传感器；14—涡轮增压系统；15—阀；16—点火传感器；17—冷却液温度传感器；18—曲轴转动频率传感器

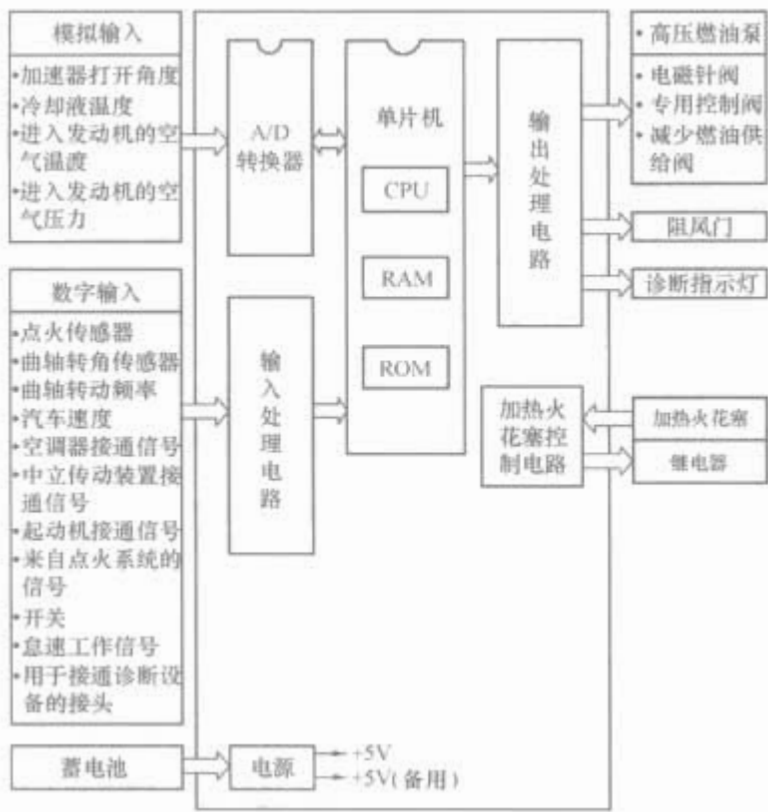


图 1.1-19 柴油发动机电子控制单元框图

门自动打开一半，这就防止了发动机过度加速。

(4) 怠速转动频率的控制。电子控制单元根据各传感器的信号，确定怠速时所要求的曲轴转动频率。然后，电子控制单元保证对喷射燃油数量进行控制（带负反馈），以使曲轴转动频率达到计算出的频率。

(5) 加热火花塞的控制。在柴油发动机起动时，根据冷却液温度和其他因素来决定加热火花塞的电流。加热火花塞的采用缩短了起动时间和起动后的预热时间。此外，由于加热火花塞工作表面的温度保持恒定，所以保证了曲轴转动频率的稳定和烟度的减少。

最后指出，在柴油发动机电子控制系统中，一个重要的执行装置就是电磁针阀。该阀安装在高压燃油泵的分配头上。它根据电子控制单元的信号，通过关闭和打开燃油的返回道来控制喷射。当喷射开始时，通过改变从柱塞上升到返回道打开的时间间隔来达到对喷射燃油数量的控制。

2.2.2 底盘电子控制系统的组成与功能

底盘电子控制系统包括传动系电子控制系统和行驶系电子控制系统，其主要控制内容如图 1.1-20 所示。其中，亦有些文献将悬架控制归入车身电子控制系统，巡航控制（恒速控制）归入发动机电子控制系统或传动系电子控制系统。



图 1.1-20 底盘电子控制系统主要控制内容

2.2.2.1 传动系电子控制系统

传动系电子控制系统的内容就是自动传动系的控制。

传动系电子控制系统的目的就是发动机的功率传给主动轮，并考虑汽车的各种运行条件，以期同时实现减少燃料消耗和提高汽车牵引—速度性能的目标。为此，根据汽车速度、节气门打开角度和各种开关的信号，电子控制模块确定汽车的状态，计算传动装置转接（转换）时刻、离合器接通和断开时刻，给出用于液压系统电磁阀开关的信号。

按传动比变化的方式分类，自动传动系的控制可分为有级式自动传动系的控制、无级式自动传动系的控制，以及介于二者之间的综合式自动传动系的控制。

(1) 有级式自动传动系的控制。图 1.1-21 所示为一种有级式自动传动系电子控制系统示意图。

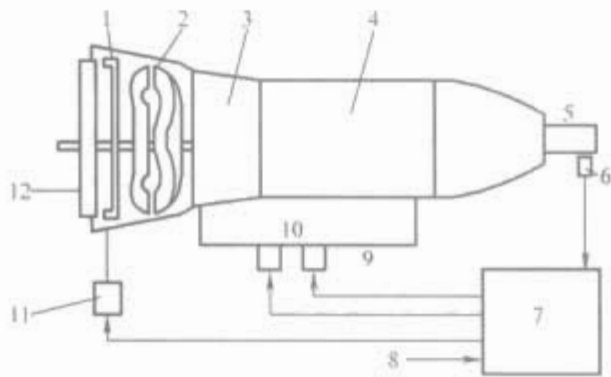


图 1.1-21 一种有级式自动传动系电子控制系统示意图

1—离合器；2—离合器摩擦片；3—加速传动机构；4—传动比改变机构；5—输出轴；6—汽车速度传感器；7—电子控制单元；8—节气门开启角；9—改变传动比的电磁阀；10—液压系统；11—离合器电磁阀；12—发动机飞轮

图 1.1-22 所示为用于有级式自动传动系控制的电子控制系统的一个例子。下面对其进行简要介绍。

1) 功能。

① 离合器的控制。根据传感器的信号，电子控制单元产生接通和断开离合器的命令。这些命令被送给电磁阀，电磁阀实现离合器的接通和切断。

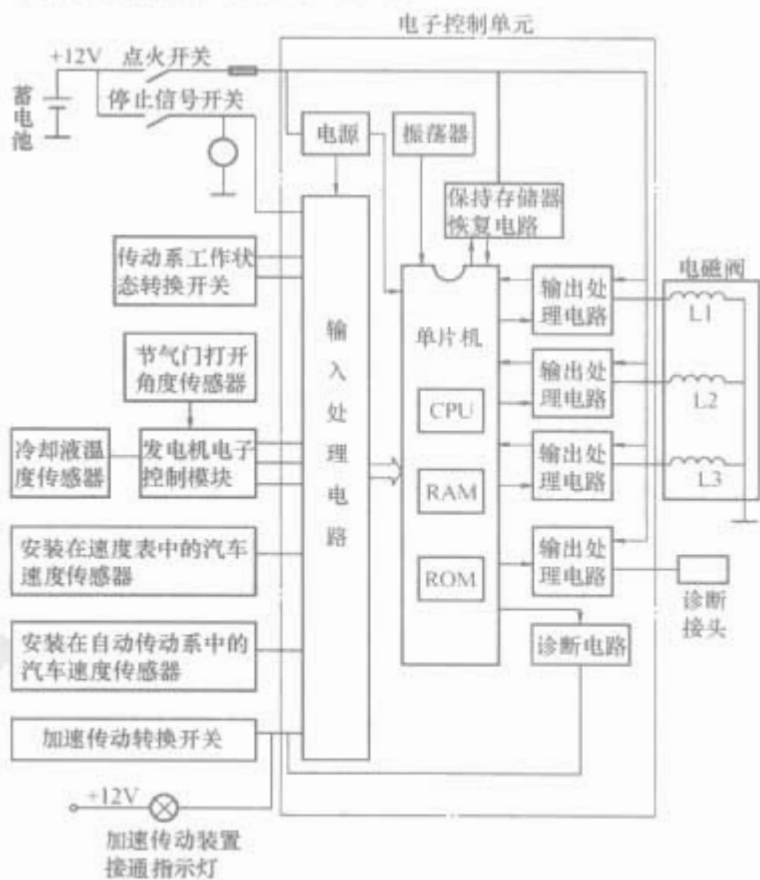


图 1.1-22 传动系电子控制系统示例

② 传动装置转接的控制。为使传动装置转接,利用2个电磁阀。“打开—关闭”这两个液压电磁阀的状态的组合,可给出4种状态(1、2、3和高传动状态)。

③ 传动装置转接时刻的控制。在传动装置转接时,离合器是断开的,以消除与传动装置转接有关的转矩变化的后果。图 1.1-23 给出了传动装置转接控制的时间波形图。



图 1.1-23 传动装置转接控制时间波形图

④ 传动装置转接控制的规律。自动传动系电子控制系统中传动装置转接控制规律(程序),能够保证将发动机的能量最佳地传给汽车的轮子,同时顾及所要求的牵引—速度性能和燃料的经济性。这里,达到最佳的牵引—速度性能和燃料的最低消耗的程序是互不相同的,因为同时达到这些目的并不总是可能的。因此,根据运行条件和驾驶员的意愿,借助于专门的转换开关,可以选择降低燃料消耗的“经济”程序、改善牵引—速度性能的“功率”程序或“手动”程序,以便将传动装置的转接信息送给驾驶员。

⑤ 起动时的控制。在开始运行时,强制进行第一传动的转接。因此,可以消除转矩的急剧变化,降低汽车的“下蹲”和噪声。

2) 传感器。

① 节气门打开角度传感器。在所给的示例中,亦是利用发动机电子控制系统中的那个节气门打开角度传感器。传感器信号经发动机电子控制模块的 A/D 转换器转换成数字信号,此后关于节气门打开角度的数据以 8 位码的形式送给传动系电子控制模块。

② 速度传感器。汽车速度传感器使用与速度表的速度传感器不同的密封触点装置,该装置在输出轴每转动一周时产生一个脉冲。

3) 执行装置。执行装置为电磁阀。电磁阀广泛用于产生调节传动装置转接的信号和离合器控制系统的液压元件的信号。在图 1.1-21 所描述的系统中,包括 2 个用于转接传动装置的电磁阀、1 个用于保证离合器工作的电磁阀、3 个用于测量的电磁阀。

4) 电子控制模块。电子控制单元计算传动装置转接和离合器接通的时刻,改变离合器的动作时间,并考虑在传动装置转接时出现的过渡过程,给出控制电磁阀的信号。此外,根据输入和输出信号,电子控制单元判明电磁阀的故障。存在故障时,电子控制单元保持系统的工作能力,以便达到最近的修理地点进行维修。

图 1.1-24 所示为另一种有级式自动传动系控制系统,图 1.1-25 所示为其电子控制单元框图。

这种自动传动系控制系统对传统传动系附加了发动机、离合器、传动装置转接和制动器控制装置,这些装置可以代替驾驶员根据电子控制单元的命令进行必要的操作。这种汽车也可算是一种配备机器人的系统。在该系统中,通过用相应的电磁连接器、传动系液压执行装置和步进电机对接通离合器和转接传动装置的机构的作用、对节气门的作用等,来

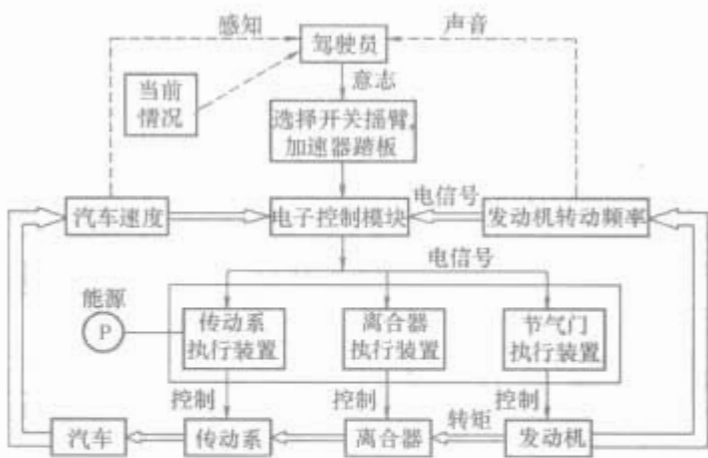


图 1.1-24 另一种自动传动系控制系统

实现传动装置转接的控制。

(2) 无级式自动传动系的控制。无级式自动传动系能够在汽车起动时和运动速度从最小到最大变化时,使传动比连续可变。系统的基本部件[电磁连接器、利用了钢带的三角带(V形带)引变装置]是由电子控制单元信号控制的。它们能够保证在损失最小,以及没有碰撞和冲击的情况下,保证传动比的平稳变化,同时达到好的汽车牵引—速度性能和高燃料经济性。

(3) 综合式自动传动系的控制。综合式自动传动系即通常所指的液力自动传动系,具有在一定范围内实现无级变速的能力。其离合器的接通和断开、制动器的制动和释放,都最终由液压控制系统的控制动作来完成。此外,液力自动传动系的液压控制系统还应具有液力变矩器的锁止、油压补偿、运动零部件的润滑及工作介质的冷却等功能。

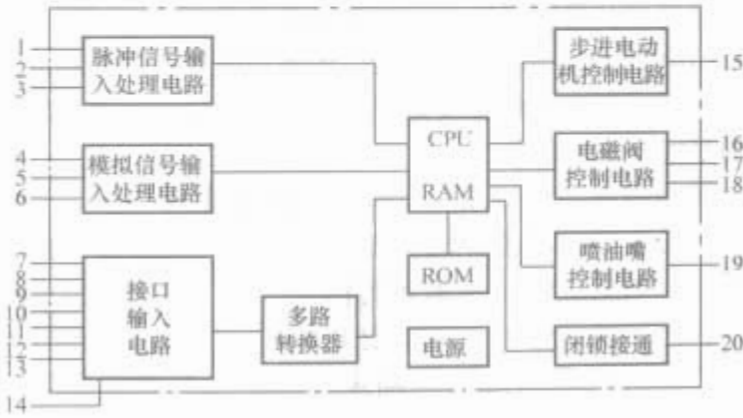


图 1.1-25 图 1.1-24 的电子控制模块框图

- 1—接通传动装置传感器; 2—发动机曲轴转动频率传感器; 3—输出轴转动频率传感器; 4—加速器踏板位置传感器; 5—离合器接通传感器; 6—冷却液温度传感器; 7—齿轮位置; 8—选择开关摇臂; 9—节气门终端开关; 10—加速器踏板终端开关; 11—空调器开关; 12—制动器终端开关; 13—给定速度运动状态开关; 14—照明开关; 15—控制节气门位置的步进电动机; 16—离合器; 17—传动箱; 18—用于在陡坡上运动的装置; 19—燃油器; 20—闭锁继电器

2.2.2.2 行驶系电子控制系统

行驶系的控制可以理解为运动过程的控制、路线变化的控制及汽车制动的控制等。行驶系电子控制系统能够改善汽车的可操作性、稳定性和舒适性。

(1) 悬架的控制。悬架是车架(或载重式车身)与车桥(或车轮)之间的一切传力装置的总称。悬架的控制可以保证汽车在各种速度和载重量的情况下处于最佳工作状态。电子控制系统控制车身相对于道路的高度、弹性元件和减震器的阻尼。

车身相对于道路高度的控制可以保证该参数的恒定,而与汽车的载重量无关。在高速运行时,车身高度的降低可使

空气动力损失减小并提高汽车在道路上的稳定性。高度手动给定系统以前也在一些汽车上应用过。电子控制系统的应用能够自动地保证车身相对于道路的最佳高度。车身高度和速度传感器的信号送给电子控制单元的输入端,电子控制单元的输出信号送给执行机构,执行机构通常为隔板,它在由泵产生的压缩空气的作用下发生位移。例如,在车厢后座有很多乘客或载满货物时,汽车处于“仰头”的状态,前照灯的光轴向上,使迎面开来的车辆产生眩目,通过对车身相对于道路高度的控制,可使汽车后部与前部相对于道路的高度一致,从而保持前照灯的光轴不变。

悬架弹性元件和减振器阻尼的控制能够提高汽车的稳定性,并且在急转弯、加速和制动时阻碍车身位置的变化。一方面,为了提高运动的舒适性,悬架应是柔软的,特别是汽车在高质量的路面上高速行驶时;但另一方面,为了使稳定性更好,悬架应足够硬,特别是汽车在凹凸不平的劣质路面上行驶时。因此,电子控制单元根据来自速度、转向轮转角、节气门开启角度传感器及制动器踏板最终开关等元件的信号,进行分析和判断,来控制执行装置,使执行装置相应的改变悬架弹性元件和每个车轮(前轮和后轮)减振器的参数,如图 1.1-26 所示。通常,执行装置为电磁阀或小型电动机,它们能够改变气动弹性元件中孔截面的大小,因而也就改变了弹性元件的弹性,或在液压减振器中使其阻尼发生变化。

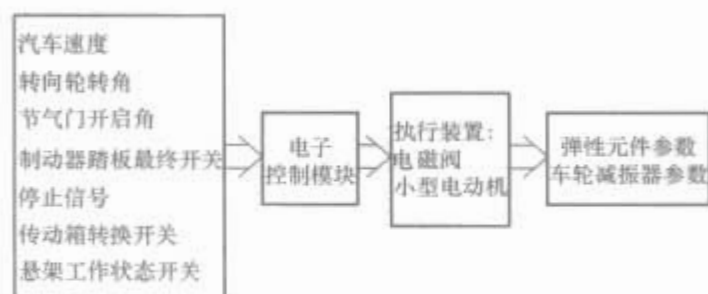


图 1.1-26 悬架弹性元件和减振器参数控制

(2) 转向的控制。用于转向控制的电子控制模块调节作用于转向轮上的作用力(在有液压增力器的情况下),或调节四个车轮的转向等。当汽车停止或低速运动时,作用于转向轮上的力减小;相反的,当汽车高速运动时,作用于转向轮上的力增大。这样就可以保证航向的稳定性和可操作性,在各种行驶条件下实现方向盘所需的力均为最佳值这一目标;亦可根据驾驶员的意愿改变方向盘上的作用力。

用于转向控制的电子控制系统的组成部分为:电子控制单元、速度和转向轮转角传感器、转向控制工作状态开关及作为执行装置的具有电磁阀的液压缸或电动机等。

(3) 制动防抱死控制与驱动防滑控制、制动力分配控制与差速闭锁控制。

1) 制动防抱死控制。制动防抱死控制的主要任务是防止汽车在制动时车轮抱死(闭锁),以提高汽车在制动时的稳定性,从而保证汽车的行驶安全性。防抱死制动系统或反锁制动系统(Anti-lock Braking System, ABS)就是为完成这一任务而发展和应用起来的,它附加于原来的制动系统上。

汽车制动效果的好坏主要取决于汽车对地面最大附着系数的利用率上。当汽车车轮的滑移率[为汽车的向前(行驶)速度与车轮的线速度的差值,同汽车的向前速度之比(一般用百分数表示)]为 15%~30%时,可获得最大的纵向附着系数和较大的横向附着系数,路面将提供最

大的纵向附着力,使制动处于最佳状态。因此,15%~30%的滑移率为最佳滑移率。然而,一般的制动装置很难将滑移率控制在 15%~30%。电子控制的 ABS 可以做到这一点。

电子控制的 ABS 可使作用在车轮制动器上的制动力按变化,以控制车轮的瞬时速度,确保车轮滑移率保持在上述最佳范围内,从而获得最佳的制动效果,显著地提高汽车制动时方向的稳定性和可操作性(特别是对潮湿路面和积雪路面),防止制动时产生侧滑、甩尾等危险现象的发生,并能缩短制动距离、减少制动时车轮的磨损、减少驾驶员的疲劳强度(特别是汽车制动时的紧张情绪)等。ABS 是汽车的一种主动安全系统,已成为世界上普遍公认的提高汽车安全性能的有效措施之一。

电子控制的 ABS 的基本组成如图 1.1-27 所示。其基本原理是,根据各车轮转速传感器的信号,通过比较汽车的向前速度和车轮的角速度,电子控制单元可以判明某个车轮的闭锁状态,并将控制信号送给执行装置(制动压力调节器),执行装置降低该车轮制动缸中制动液体的压力(或制动气室中制动气体的压力)。只要该车轮的速度一增加,制动液体(或制动气体)的压力就重新增加,然后再重复这个过程。应该指出,在车轮滑移时,汽车的(向前)速度是很难测定的。解决办法之一是利用多普勒(Doppler)雷达,根据多普勒效应测定汽车的速度,但制动系统须增加一个测速雷达,其电路复杂、成本高,因而限制了它的广泛应用。通常,利用计算出的车轮的平均速度作为基准速度。

2) 驱动防滑控制。汽车在制动时,使用滑移率来描述滑移的程度;汽车在起动或加速时,也可能出现车轮速度大于汽车向前速度而导致车轮打滑或空转的现象,即所谓滑转,滑转的程度用滑转率来描述。车轮的滑转率为车轮线速度与汽车向前速度的差值与车轮线速度之比(通常用百分数表示)。当车轮的滑转率为 5%~25%时,车轮与路面间的纵向和横向附着系数都很大,此范围的滑转率即为最佳滑转率。电子控制的防滑调节(Anti-Slip Regulation, ASR)系统或驱动力控制系统(Traction Control System, TCS),就可将滑转率控制在最佳范围内。

控制车轮的滑转率是通过调节作用于车轮上的力矩(制动力矩或驱动力矩)来实现的,即使车轮的力矩与车轮所能获得的最大纵向附着力相适应;在非对称路面,对传到驱动轮上的转矩实现最佳分配。

车轮所能获得的纵向附着力取决于轮胎与路面间的垂直载荷和附着系数,这二者均受诸多因素的影响,其中有些因素在汽车的实际行驶过程中还是随机变化的,因此车轮的附着力实际上是一个随机变量。所以,为了控制车轮的滑转率,就需对作用于车轮的力矩进行实时的自适应调节,即要求 ASR 系统具有良好的动态特性和控制精度,否则就难以将车轮的滑移率控制在理想的范围内。

ABS 控制滑移率、ASR 系统控制滑转率,二者的控制



图 1.1-27 电子控制的 ABS 的基本组成

区间相反。ABS是在制动过程中通过调节制动缸（或制动气室）的制动压力使作用于车轮的制动力矩受到控制，从而将滑移率控制在理想的范围内。ASR系统是在驱动过程中，通过调节发动机的输出转矩、传动系的传动比、差速器的锁紧系数（锁止程度），以及驱动车轮的制动缸（或制动气室）的制动压力等手段，来控制作用于驱动轮上的驱动力矩，实现对驱动车轮牵引力矩的控制，从而将滑移率控制在理想的范围内。

ASR系统是ABS的延伸，是对ABS的完善和补充。ABS保证了汽车制动过程中方向的稳定性、可操作性，并缩短了制动距离；ASR系统则保证了汽车行驶过程中（启动、加速时，特别是在非对称路面行驶或在转弯时驱动轮空转的情况下）的方向稳定性、可操作性和最佳驱动力。若在汽车上同时安装ABS和ASR系统，则汽车的方向稳定性和可操作性会得到极大提高，汽车的安全性能会更有保障。ASR系统亦可不受ABS的限制而独立装车使用。

3) 制动力分配控制。制动力分配控制是由电子制动力分配（Electronic Brake force Distribution, EBD）系统完成的。

汽车理论指出，汽车在制动过程中若前轮先抱死拖滑，则汽车能维持直线减速停车，汽车处于稳定状态；若后轮比前轮先抱死，则汽车在横向干扰力作用下可能发生侧滑、甩尾或回转运动，且制动开始时车速越高这种现象越严重。为了防止出现汽车制动时后轮先抱死的现象，研制出一种专门检测后轮制动情况，并可自动调节制动力分配的电子控制系统，即EBD系统。

EBD系统是ABS的辅助功能，其工作原理也与ABS的相同，只是它判断车轮是否抱死的门限值（阈值）比ABS的低。因此，EBD系统先于ABS工作，且ABS工作后，EBD系统就停止工作。从驾驶员踩制动踏板到ABS启动前，即EBD系统工作期间，EBD系统依据汽车的重量和路面条件来控制制动过程：自动地以前轮的滑移率为基准去比较后轮的滑移率，若发现前、后轮的滑移率不同，且二者的差值达到所设定的阈值时，便自动地调整汽车制动液压系统，使前、后轮的制动压力接近理想制动力的分配，即使各个车轮的有效地面附着力相互平衡或匹配，从而防止了出现后轮先抱死的情况，亦缩短了汽车制动距离。一种具体情况是，在过度制动时，因汽车质量前移而使后轮有失去附着能力的危险，此时后轮极易抱死，装有EBD系统的汽车出现这种情况时，通常会激活EBD系统，EBD系统相应地减小后轮制动力，将施加于前轮的制动力增大，这一动作亦使ABS的启动延缓，从而使制动距离更短、ABS的效用更高。

EBD系统可利用现有ABS的硬件，通过增加所需的监控软件来实现汽车前、后轮的制动力分配之功能。

当汽车同时装有ABS和EBD系统时，在其制动项目上常有“ABS+EBD”之写法。

4) 差速闭锁控制。差速闭锁控制是由电子差速系统（Electronic Differential System, EDS）或电子差速闭锁驱动（Electronic Differential Locking Traction Control, EDL）系统完成的。

EDS是ABS的一种扩展功能，其工作过程是：在汽车加速或启动过程中，当EDS根据ABS的车轮转速信号判断出某一侧驱动轮打滑时，EDS即通过ABS的液压控制单元对该车轮进行适当强度的制动，以此来提高另一侧驱动轮的

附着利用率，从而提高汽车的通过能力；当汽车的行驶状况恢复正常后，EDS即停止工作。一般情况下，EDS只有在汽车速度低于一定值（如40km/h）时才投入工作。

一些高档车型已装备了EDS，如奥迪A6、奥迪A4、帕萨特、宝来和桑塔纳3000等车型。

与普通汽车相比，带有ABS+EDS的汽车可以更好地利用地面附着力，从而进一步提高汽车的行驶性能和安全性。

(4) 恒速控制。用于恒速控制的电子控制系统是一个闭环控制系统，它可在驾驶员设定期望速度后，根据行驶阻力的变化自动地增减节气门的开度，使汽车保持恒速运动，而不必踩下加速器踏板。恒速控制的目的是减轻驾驶员的驾驶操纵劳动强度，提高行驶舒适性。汽车在高速公路行驶时特别适合使用这种系统。

恒速电子控制系统的示意图如图1.1-28所示，图中速度给定器用于驾驶员设定期望速度、接通系统电源；执行机构为带有小型电动机的装置或真空（气动）装置，用于控制节气门的开度。若选择了恒速控制状态，则电子控制单元根据速度传感器的信号计算出当前运动速度，并使执行机构动作，执行机构控制节气门的位置。恒速控制系统的切断是依据解除（取消）信号实现的，解除信号来自制动器踏板开关、离合器踏板开关和驻车制动器（手动刹车）开关。

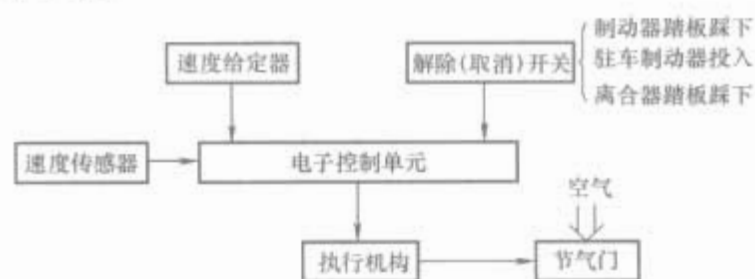


图 1.1-28 恒速电子控制系统示意图

恒速电子控制系统的基本控制原理是，在电子控制单元中已存储了平坦道路、上坡道路和下坡道路的车速 v 与节气门开度 θ 的关系曲线（ $v-\theta$ 曲线），在进入恒速控制状态的情况下（速度设定为 v_0 ），若汽车已经以速度 v_0 在平坦道路上行驶，且根据平坦道路的 $v-\theta$ 曲线，节气门开度为 θ_0 ，则只要继续保持节气门开度为 θ_0 即可；若汽车驶入上坡道路，根据上坡道路的 $v-\theta$ 曲线，为保持速度仍为 v_0 ，则需将节气门开度从 θ_0 调整为 θ_H （ $\theta_H > \theta_0$ ）；若汽车驶入下坡道路，根据下坡道路的 $v-\theta$ 曲线，为保持速度仍为 v_0 ，则需将节气门开度调整为 θ_L （ $\theta_L < \theta_0 < \theta_H$ ）。

恒速电子控制系统还具有加速、减速和恢复原速等功能。此外，为了防止汽车飞驰，系统具有高速限制电路（一般当车速高于200km/h起作用）和低速限制电路（一般当车速低于40km/h起作用），即恒速控制的车速范围一般为（40~200）km/h。

(5) 轮胎气压监测。轮胎是汽车接触地面的唯一部件，是乘客与车辆的载体。轮胎作为一个充气物体，主要依靠胎腔内的空气起作用，更确切地说是依靠空气的压力起作用。空气压力承担负荷并影响汽车行驶的动态性能，甚至影响汽车的舒适性。轮胎是汽车中最关键的部件之一。现在所有轮胎基本上都是无内胎的子午胎，其基本结构如图1.1-29所示。

使轮胎保持符合要求的正确（合适）气压、温度，是安全驾车的最基本要求，气压不足和气压过高均使胎面与路面的接触面减小，正确气压可以保证胎面与路面形成最大的接

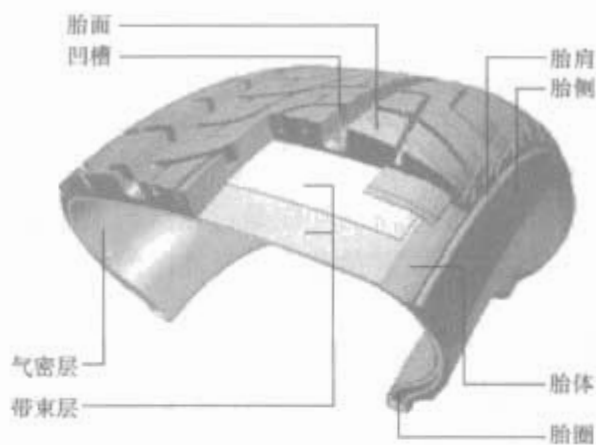


图 1.1-29 子午胎基本结构

触面，如图 1.1-30 所示。

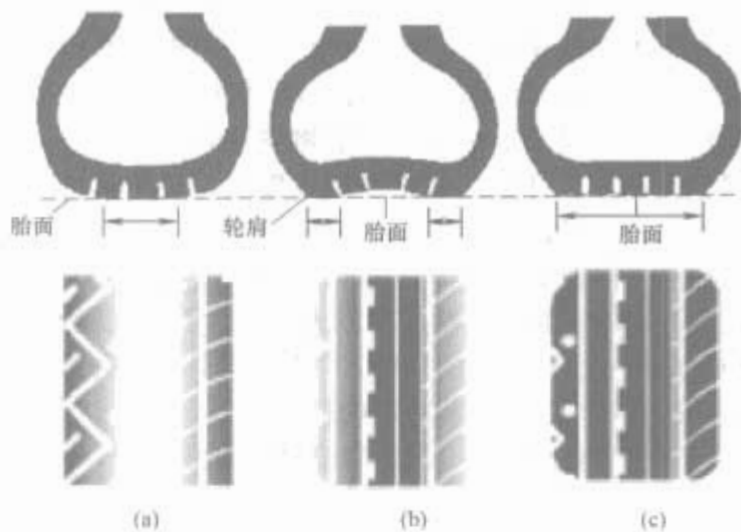


图 1.1-30 不同轮胎气压下胎面与路面的接触
(a) 气压过高；(b) 气压不足；(c) 正确气压

轮胎气压严重不足时会导致恶性撞车或翻车事故的发生。一般情况下，轮胎气压不足会产生以下现象：

- 1) 胎面与地面不能形成最佳接触，在速度较快转向时，车轮因失去抓地力不能正常转动而抱死，导致硬性滑行，使车辆失去控制。
- 2) 轮胎发生形变，胎面排水沟挤塞，在有水的路面行驶时容易形成轮胎“水滑”现象。
- 3) 各轮胎受力不均，制动距离延长。
- 4) 轮胎因受到结构性的破坏而漏气塌陷甚至爆裂（在爆裂前轮胎温度会上升）。
- 5) 轮胎超载运行。

轮胎气压过高时，胎面中心载重加大，造成胎面中心部位过度磨损，同时也会导致轮胎结构受损，影响轮胎使用寿命；当轮胎正面受到外物冲击时，容易产生外伤，这些情形对轮胎所造成的损害也是导致爆胎的原因。另外，轮胎气压过高时，轮胎抓地力减小，制动性能降低，也会使车辆跳动、车辆悬挂系统受损，驾驶员驾车舒适性降低、容易疲劳。因此，对轮胎气压的监测是十分必要的。

轮胎气压监测系统可分为间接式、直接式和复合式三种。

间接式轮胎气压监测系统（以下简称间接式系统）是基于汽车的 ABS 硬件、通过增加相应的功能软件来实现的。其基本原理是，根据 ABS 中车轮转速传感器传来的信号，通过比较各轮胎的转速来判断各轮胎的气压是否正常，因为缺气的轮胎转速比正常轮胎转速要快；当轮胎气压降低时，同样车辆的重量会使轮胎直径变小，从而导致车速发生变化。

直接式轮胎气压监测系统（以下简称直接式系统）要

求在每个轮胎内均安装压力传感器及无线发射器，将压力信息从轮胎内部发送到系统的接收器并送给电子控制单元进行处理。这种系统的关键在于无线信号传输的稳定性和可靠性（特别是在汽车高速行驶时）、压力传感器的耐用性等。

直接式系统可以实时地测定每个轮胎内部的实际气压，很容易确定故障轮胎，但成本较高。间接式系统相对便宜，只需对已经装备了 4 轮 ABS（每个轮胎装备 1 个轮速传感器）的汽车进行软件升级，但这种系统没有直接式系统准确率高，而且系统校准极其复杂；此外，在某些情况下系统可能无法正常工作（如同轴轮胎或 2 个以上轮胎缺气时）。

复合式轮胎气压监测系统（以下简称复合式系统）介于上述两个系统之间：在装备了 4 轮 ABS 的基础上，在两个互成对角的轮胎内装备压力传感器。与直接式系统相比，复合式系统可以降低成本，克服间接式系统不能检测出多个轮胎同时出现气压过低的缺点，但仍然不能提供所有 4 个轮胎内实际压力的实时数据。

2.2.3 车身电子控制系统的组成与功能

车身电子控制系统包括安全性电子控制系统、舒适性与方便性电子控制系统和其他电子控制系统，其主要控制内容如图 1.1-31 所示。



图 1.1-31 车身电子控制系统主要控制内容

2.2.3.1 安全性电子控制系统

(1) 安全气囊控制。安全气囊的控制主要是由安全气囊电子控制系统（以下简称安全气囊系统）实现的。

安全气囊系统即为辅助防护系统（Supplemental Restraint System, SRS）或辅助防护安全气囊系统（Supplemental Restraint Safe Air Bag System），是一种被动安全系统。除正面 SRS（在汽车遭到正面碰撞时起保护作用）外，还有侧面 SRS（Side Supplemental Restraint Safe Air Bag System, SSRS），在汽车遭到侧面碰撞时起保护作用。

1) 安全气囊系统的功能。安全气囊系统是座椅安全带的辅助装置，只有在使用安全带的情况下，该系统才能充分发挥保护驾驶员和乘员的作用。当汽车发生正面碰撞或侧面碰撞时，汽车与汽车或汽车与障碍物之间的碰撞称为一次碰撞；一次碰撞后，汽车速度急剧变化，驾驶员和乘员因受到惯性力的作用而向前面或向侧面运动，与车内的方向盘、风窗玻璃、仪表板等构件发生碰撞或与车门、车窗玻璃、车门立柱等构件发生碰撞，这种碰撞称为二次碰撞。为了减轻或避免驾驶员和乘员在二次碰撞中所受的伤害，汽车上装备了

座椅安全带和 SRS 等被动保护装置。

在汽车碰撞事故中,导致驾驶员和乘员遭受伤害的主要原因是二次碰撞。安全气囊系统的功能是:当汽车发生碰撞导致减速度急剧变化时,气囊迅速膨胀,在驾驶员、乘员与车内构件之间迅速铺垫一个气囊,利用气囊排气节流的阻尼作用来吸收人体惯性力产生的动能,从而减轻人体遭受伤害的程度;正面气囊主要用于保护驾驶员和乘员的脸部和胸部,侧面气囊主要用于保护驾驶员和乘员的头部和腰部。

2) 安全气囊系统的组成。安全气囊系统主要由碰撞传感器、电子控制单元、安全气囊组件和指示灯等组成。碰撞传感器按其功能可分为碰撞信号传感器和碰撞防护传感器两种:碰撞信号传感器又称为碰撞烈度(激烈程度)传感器,安装在汽车左前、右前、前部中央和电子控制单元内部,分别称为左前、右前、中央和中心碰撞传感器,其作用是检测汽车碰撞时的减速度并将其输入电子控制单元,用以判断是否发生碰撞;碰撞防护传感器简称防护传感器或安全传感器或保险传感器,一般均安装在电子控制单元内部,其作用是控制气囊点火器电源电路。电子控制单元由备用电源电路、故障监测与诊断电路及点火引爆电路等组成,一般安装在换挡操作手柄前面或后面的装饰板内、后排座椅下面中部位置或后备箱内;当电子控制单元内部装有碰撞传感器时,电子控制单元应安装在汽车纵向轴线上,以便该传感器能准确地检测碰撞信号。安全气囊组件又称辅助防护系统组件,由气囊、螺旋弹簧(螺旋线束)、气体发生器和点火器等组成。指示器用于指示辅助防护系统的工作状态,当系统发生异常时,指示器发亮报警。

3) 安全气囊控制原理。以汽车发生正面碰撞为例来说明安全气囊控制原理。当汽车发生前方一定角度范围内的碰撞时,安装在汽车前部和电子控制单元内部的碰撞传感器均会检测到汽车突然减速的信号,并将该信号送入电子控制单元,用以判断是否发生碰撞。当汽车遭受碰撞且减速度达到设定阈值时,电子控制单元发出控制命令将气囊组件中的点火器(电雷管)电源接通使点火器引爆,点火剂(引药)受热爆炸(电热丝通电发热引爆炸药)迅速产生大量热量,使充气剂(叠氮化钠固体药片)受热分解并释放出大量氮气充入气囊,气囊便冲开气囊组件上的装饰盖板并鼓向驾驶员或乘员,使驾驶员和乘员面部和胸部压靠在充满气体的气囊上,在人体和车内构件之间铺垫一个气垫,将人体与车内构件之间的碰撞变为弹性碰撞,通过气囊产生变形和排气节流来吸收人体碰撞产生的动能,从而大大减轻人体被伤害的程度。

(2) 座椅安全带控制。

1) 座椅安全带控制系统的组成与功能。如上所述,安全气囊系统是座椅安全带的辅助控制装置。为了充分发挥安全带的保护作用,确保驾驶员和乘员的安全,部分中高档轿车在装备安全气囊系统的同时,装备了座椅安全带(电子)控制系统,从而构成了一个完整的辅助防护系统。

在组成上,座椅安全带控制系统仅是在安全气囊系统的基础上,增设了防护传感器和左、右座椅安全带收紧器。具体地说,座椅安全带控制系统由碰撞防护传感器、中心碰撞传感器、前碰撞传感器、电子控制单元和安全带收紧器组成。其中,作为执行器的安全带收紧器又称为安全紧急张紧收缩器(Emergency Tensioning Retractor, ETR),由导管(又称气缸)、活塞、钢丝绳、气体发生器(包括充气剂和点

火器)和安全带收缩棘轮组成,安装在前排座椅左、右两侧或前左、右车门立柱旁边。通常,座椅安全带控制系统与安全气囊共用一个电子控制单元,中心碰撞传感器、前碰撞传感器亦共用。

座椅安全带控制系统的功能是:在汽车发生碰撞时,迅速收紧安全带,缩短驾驶员和乘员身体向前移动的距离,避免身体受到伤害。

2) 座椅安全带控制原理。当汽车发生碰撞且减速度达到防护传感器的设定阈值时,首先将安全带点火器电源接通;同时,若减速度达到中心传感器和前碰撞传感器的设定阈值,则电子控制单元会判定为发生碰撞,并立即发出命令接通安全带收紧器的点火器电路,电热丝通电发热引爆引药,引药释放大热量使充气剂受热分解并释放大量氮气充入收紧器导管,活塞在膨胀气体的推力作用下带动钢丝绳迅速移动,而钢丝绳通过棘轮机构带动安全带卷筒转动将安全带收紧;在 8ms 内能将安全带收缩 10~15cm,使驾驶员和乘员身体向前移动距离缩短,避免其面部、胸部与方向盘、风窗玻璃或仪表板发生碰撞。

在电子控制单元向安全带收紧器的点火器发出点火命令的同时,还向气囊点火器发出点火命令,引爆气囊点火器。亦即在座椅安全带收紧的同时,气囊胀开,吸收碰撞产生的动能,达到保护驾驶员和乘员的目的。

(3) 汽车防撞控制。汽车防撞控制的目的在于减少因车与车、车与物体、车与人之间的碰撞而引发的事故,减轻驾驶员的紧张和疲劳程度,增强驾驶安全性,提高驾驶舒适性。

用于汽车防撞控制的电子控制系统亦是汽车主动安全性产品,按其用途或发展阶段基本可分为倒车辅助系统和碰撞避免系统。在这些系统中,防碰撞传感器或传感测距装置(系统)是其重要部件,主要有红外线传感测距装置、雷达式传感装置、激光测距装置、超声波障碍物距离传感器、电荷耦合器件(CCD)摄像元件和图像处理系统等。

倒车辅助系统可以说是最简单、应用最早的碰撞报警系统。这种系统在汽车后部保险杠附近装有雷达或超声波传感器,监测汽车后面的汽车、物体或行人,测量汽车与其后面的汽车、物体或行人的距离。当系统监测到一定距离内有汽车、物体或行人时,就通过声音或指示灯向驾驶员报警,且声音或指示灯的频率随距离的缩短而提高,以帮助驾驶员倒车或停车。

防撞报警系统是碰撞避免系统发展的初级阶段。当系统探测到可能与其周围的车辆、物体或行人出现碰撞危险时,就向驾驶员发出报警,从而使驾驶员有时间做出相应的反应,以避免车祸的发生。有的碰撞报警系统中,在汽车的前方装有传感测距装置,用以测量本车与前方车辆、物体或行人的距离;有的碰撞报警系统中,在汽车的两侧装有传感测距装置,用以测量本车与两边邻近行车道上车辆、物体或行人的距离;有的碰撞报警系统中,在汽车的前方和两侧都装有传感测距装置,用以测量本车与前面及两边邻近行车道上车辆、物体或行人的距离,在汽车前行和换道时,均能为驾驶员提供帮助。

倒车辅助系统不具备控制车速和改变行车方向的功能,可以不依赖于其他控制系统而独立存在,往往可在售后服务站作为附件安装。

碰撞避免系统以自动行驶和碰撞报警系统为基础,具有避免碰撞的功能。碰撞避免系统是更高一级的主动安全系

统，是开发研究的一个热点。当系统监测到有可能出现碰撞危险时，不仅能像自动行驶系统那样辅助驾驶员控制车速，也能帮助驾驶员改变行车方向，避免本车与前面及两边的车辆、物体或行人发生碰撞，还能辅助驾驶员主动防止因疏忽而驶离行车道的情况发生。

(4) 防盗安全系统。汽车防盗安全系统有机械式防盗系统和电子控制防盗系统。机械式防盗系统使用不便，已逐渐被淘汰。电子控制防盗系统通常与电子控制中央门锁和报警装置联合使用，属于高档的防盗系统，有的系统包括红外监视、超声波传感器、倾斜传感器及电子止动系统。当盗贼强行打开车门、行李箱门、发动机盖，试图进入车内起动车辆时，报警声音响起、灯光闪烁、发动机无法工作，使盗贼惊慌失措、仓皇逃窜，从而达到汽车防盗的目的。

(5) 车灯控制。用于车灯控制的电子控制系统根据光线传感器检测到的车外天气光亮程度的信号，接通或切断前照灯和后灯的电源，以保证汽车行驶的安全性和使用的方便性，并提高汽车的行驶速度。

2.2.3.2 舒适性与方便性电子控制系统

(1) 车用空调控制。决定人体舒适感的条件有三大要素：温度、湿度和风速。车用空调控制的目的是要在车内创造出有利于人体舒适的空气环境。

车用空调的控制主要是指车用全自动空调的电子控制，即车用空调的控制是通过全自动空调电子控制系统实现的。系统根据各种温度传感器及其他传感器送来的信号（车内温度、车外温度、太阳辐射强度、蒸发器温度、发动机冷却液温度、发动机工作状态、压缩机工作状态等），计算出经过空调热交换后送入车内应达到的出风温度，对内、外空气选择伺服电动机、混合空气调节器开度、风扇驱动电动机转速、冷却器（或加热器风门）、压缩机等进行相应的控制，将车内温度保持在设定的温度范围内，使车内的温度、湿度始终处于最佳值，为驾驶员和乘员提供一个舒适的车内环境。

(2) 车内照明控制。车内照明控制主要包括钥匙孔照明灯自动控制、车门灯自动延时控制、车灯灯丝断路报警控制、车用日光灯控制等。

(3) 车内噪声控制。汽车车内噪声控制日益受到人们的重视。汽车所有噪声源几乎都会在车内产生噪声，而且汽车本身对外部噪声可能有放大作用，因此车内噪声控制是一项相当复杂的工作，达到减少乃至消除噪声的目的的途径亦是各种各样的。车内噪声控制主要包括减弱噪声源（发动机噪声、车内其他噪声等）以降低其噪声级、隔绝噪声和振动的传入途径、对车室进行吸声处理、消除与防止车室共鸣与风振现象等。

车用空调控制、车内照明控制和车内噪声控制均属于汽车环境控制的范畴。

2.2.3.3 其他电子控制系统

其他电子控制系统主要包括充电控制、电源管理等。充电控制主要是指对汽车蓄电池充电电压、电流（包括其幅值、频率、波形等）、充电时间的动态控制；电源管理主要是指对汽车电源设备、电能分配的调节控制、保护和管理，给出电源设备的工作状态、各主要用电设备的用电功率及动态变化情况等。充电控制和电源管理的目的是延长电源设备及用电设备的使用寿命，保证对用电设备的正常供电，为驾驶员提供电源设备健康状态、用电设备功率分配及故障检测、诊断与预测等信息。

2.3 汽车电子信息系统的组成与功能

汽车电子信息系统的组成如图 1.1-32 所示。



车辆信息显示系统又称为驾驶员信息系统，正处于不断发展和完善阶段。该系统由车况检测部件、车载计算机和电子仪表三部分组成。车况检测部件主要是指液位、压力、温度、灯光等传感器，用来检测发动机、制动系统、电源系统以及车灯等的故障，比传统仪表板的报警功能更强。车载计算机提供的信息能够提高行车的安全性、燃油经济性及乘车舒适性，可使驾驶员获得平均油耗、瞬时油耗、平均车速、可行驶里程、驾驶时间、温度、时钟等有关驾驶信息。这些信息在需要时可通过键盘或按钮在电子仪表上显示出来。

图 1.1-32 中所列的汽车音响是在多数汽车上使用的汽车视听设备。与家用音响相比，汽车音响要满足汽车的安装要求、使用条件（耐冲击与振动、耐高温、抗电磁干扰等）、夜间照明；某些汽车音响还具有防盗功能。汽车音响的显示装置正在由电子阴极摄像管（CRT）显示器逐渐向更轻更薄的液晶显示器转变。

车载对外通信设备亦处在不断发展之中。

2.4 智能交通系统的组成与功能

智能交通系统（Intelligent Transport System, ITS）是为了解决人、车、路三者之间的矛盾问题、使交通本身的机能得到充分发挥而产生的。它是一种将人、车、路综合起来考虑，充分利用各种现代科学技术而建立起来的实时、准确、高效、智能的综合交通管理体系。智能交通系统通过对交通信息的实时采集、传输和处理，对各种交通情况进行监控和协调，从而使交通设施得以充分利用并提高交通效率 and 安全性、减少环境污染，使交通运输服务和管理智能化，最终使交通运输的社会效益和经济效益得到最大限度的发挥。

智能交通系统的基础设施主要包括较完善的道路设施、路表设施（设备）（道路、停车场等地所安装的传感器、通信设施，检测、监视、控制设备等）和汽车上的通信、显示、检测和控制装置以及交通（管理调度）中心的通信设施和信息处理设备等，还有用于道路设施、汽车、交通中心之间进行信息交换的通信网路。所应用的技术主要有信息技术（通信技术）、自动控制技术、视频监控技术、检测与转换技术、电子技术、全球定位技术、地理信息系统（地图匹配技术）、计算机技术以及系统工程技术等。

智能交通系统是迄今为止在整个交通领域中技术含量最高、涉及技术种类最多、参与部门最广、实现难度最大的综合性系统，在一些国家（主要是发达国家或经济发展较快的

国家)正处于大力开发中,在有的国家正处于规划之中。图1.1-33所示为智能交通系统的基本组成。

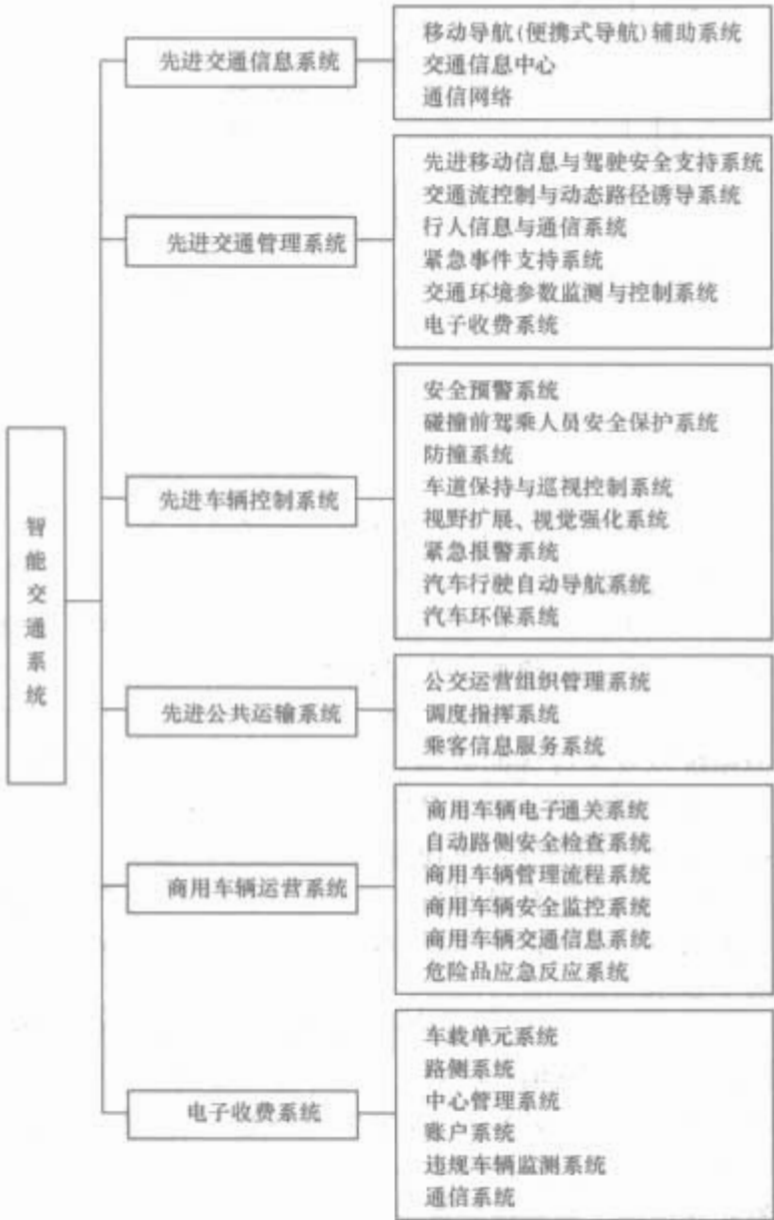


图 1.1-33 智能交通系统的基本组成

先进交通信息系统具有电子地图显示功能,包括全屏显示、放大和缩小、漫游、旋转、动态标记、分层显示、空间检索和分析等,在交通信息中心的电子地图上显示每个运行车辆的动态运行情况;标注当前车辆位置功能,可实时接收移动车辆的全球定位系统的定位数据,将地理坐标转换为屏幕坐标;地图查询功能;动态路径诱导功能,可根据用户需求和实时交通信息,对用户选择的任意两点按照一定的路径搜索算法给出最佳路径;数据、话音通信功能可在移动车辆与交通信息中心之间进行数据通信或语音联络;交通诱导功能,可让用户登录网站查询电子地图、了解实时交通状况、选择最佳路径来进行交通诱导,亦通过向路边交通诱导显示牌发送当前交通状况信息来进行交通诱导。

先进交通管理系统具有信息提供功能;交通控制功能,可根据实时交通运输信息,对高速公路和城市道路网进行综合的动态控制,确定车辆与行人通行在道路网上的最佳分配;交通事故处理功能,可帮助交通运输部门和管理人员预测交通或道路状况并采取相应的预防措施,迅速检测事故的发生并立即提供相应的交通控制措施;排放测试与污染防治功能,可采用汽车排放测试系统确定有关环保“热点”并在空气质量敏感地区采取道路改线或交通量控制等措施,确定排放超标的车辆并将有关信息提供给司机或车队管理人员以采取相应的治理措施;应急管理功能,可用于提高对交通突发事件(事故或灾害)的报告和响应能力,改善应急响应资源配置;自动收费(电子收

费)功能,用于提高收费站通行能力,使驾驶人员不停车、不用现金进行自动付账,堵塞收费漏洞;提高养护操作效率;可对路面状况作出正确判断并对相应的养护作业提供工作计划和实施方案;特种车辆通行管理功能:用来保障路面结构正常使用,避免事故发生,包括特种车辆通行许可的申请、处理、信息存储与提供以及不停车自动称重系统。

先进车辆控制系统是指利用车辆的检测、通信设备及路侧、路表的电子设备来获得周围行驶环境的实时状况,以实现车辆的部分或完全的自动驾驶控制的系统,目的是提高行车安全和道路通行能力。

一个完善的先进车辆控制系统在物理上主要由智能车辆、智能道路、智能车辆与智能道路之间的通信系统,及智能车辆与智能车辆之间的通信系统组成。在智能交通系统中,先进车辆控制系统与汽车本体的关系最为密切、技术集成度最高,实现难度也最大,目前尚处于研究试验阶段。

先进车辆控制系统强调的是行驶安全性。从当前的发展看,它可以分为两个层次:车辆辅助安全驾驶系统和自动驾驶系统。

先进公共运输系统能提供合理、优化的公交运营管理组织模式,既为公交带来效益,更为乘客出行带来优质服务;借助于先进的定位通信系统和地理信息系统,通过辅助调度系统提供的预案支持,大大提高调度员的处理能力;发布线路及车辆运行信息,为乘客出行提供全方位的信息服务;为公共汽车站、停车场、客运站及行驶途中的公共汽车或合乘车辆提供行驶或工作环境安全监测,及时预警并在必要时进行自动控制直到危险解除。

商用车辆包括货运汽车、公共汽车、出租车和紧急车辆。商用车辆运营系统能增强运输企业的生产能力、提高装备与设施的使用效率、更好地执行载重规定等运输规章、减少基础设施的维护保养和更新费用、提高运输安全性和运营效率。

商用车辆运营系统具有为商用车辆运营户提供电子通关,对高速行驶中的车辆和货物状态及司机的安全情况进行监测、预警并在必要时进行自动控制,对运送危险品的车辆在发生事故时能立即确定事故的严重程度、事故地点、危险品种类并推荐最佳应急方案,为司机提供交通信息、确定车辆位置、避开交通阻塞路段等功能。

电子收费系统可以包含在先进交通管理系统等系统中,但因其独立性和通用性,往往将其作为一个单独的系統来研究、开发。电子收费系统中安装在车辆挡风玻璃上的电子标识卡(存储与车辆收费有关的信息,如预缴金额、车辆型号、车牌号码、车主的有关资料等)与安装在收费车道旁的读写收发器,通过微波或红外线进行快速的数据交换,系统按相应的标准计算金额,通过联网的银行或提前预缴的赋值卡进行结算,实现车辆的不停车收费。电子收费系统能迅速完成对道路使用者的收费,减少车辆因交费而产生的交通延误和拥堵;规避了人员收费可能造成的失误和违规操作,使收费的效率和准确性大大提高;降低了收费成本和因收费而消耗的社会费用;可减少汽车因加减速而消耗的能源及尾气的排放量,有利于环保;对违规车辆进行拍照或摄像,将得到的图像通过通信网络传送给有关机构,以用于后续追缴和处罚的证据。

2.5 汽车车上网络的组成与功能

汽车车上网络包括车内控制网络和车载信息网络(见表

1.1-2) 以及车载对外通信网络(或称车载无线网络)。车内控制网络主要是指用于图 1.1-1 中汽车电气系统(包括汽车电器系统和电子控制系统)和智能交通系统中先进车辆控制系统,以及图 1.1-32 中汽车电子信息系统车辆信息显示系统的车上网络;车载信息网络主要是指用于图 1.1-32 中

汽车电子信息系统中汽车音响的车上网络,智能交通系统中除先进车辆控制系统以外的汽车上的有线网络;车载对外通信网络(车载无线网络)主要有蓝牙、蜂窝无线网络、GSM、GPRS 等(由于它们在技术上的独立性,故在表 1.1-2 中未列出)。

表 1.1-2 主要汽车车上网络

汽车网络	网络、协议级别、名称		最高通信速率	支持及组织机构	说 明	
车内控制网络	A 级 (A 类) (一般不大于 10kbit/s)	LIN		20kbit/s	LIN 协会	A 级为低速网络, 传输少量数据, 可用于智能传感器、执行器; 车身控制
		TTP/A		—	TTT 公司	
		CAN A (低速 CAN)		125kbit/s	Bosch 公司, ISO	
	B 级 (B 类) (10~125kbit/s)	CAN B (低速 CAN)		125kbit/s	Bosch 公司, ISO	B 级为中速网络, 用于一般的信息传输场合, 例如仪表; SAE J1850 主要为美国汽车公司所应用; VAN 主要为法国汽车公司所应用
		SAE J1850		41.6kbit/s	Ford Motor 公司, SAE	
		VAN		125kbit/s	ISO	
	C 级 (C 类) (125kbit/s~1Mbit/s) 及其以上级别 (大于 1Mbit/s)	CAN 以及基于 CAN 的协议	CAN C (高速 CAN)	1Mbit/s	Bosch 公司 (开发), ISO	C 级为高速网络, 用于实时控制的场合, 例如动力传动系统; SAE J1939 和 TTCAN 均为基于 CAN 的高层协议, SAE J1939 用于卡车和客车, TTCAN 主要用于线控系统、安全性控制
			SAE J1939	250kbit/s	SAE	
			TTCAN	1Mbit/s	Bosch 公司, CiA	
		FlexRay		5Mbit/s	FlexRay 共同体	主要用于线控系统、安全性控制
		Byteflight		10Mbit/s	BMW 公司等	
		TTP/C		25Mbit/s	TTP/C 共同体	
车载信息网络		DDB/Optical		5.6Mbit/s	C&C 公司	音频系统通信协议
	MOST		22.5Mbit/s	MOST 共同体	信息系统通信协议, 以欧洲为中心, 由 Deimler Chrysler 与 BMW 公司支持	
	IEEE1394		100Mbit/s	1394 工业协会	信息系统通信协议, 有转化成 IDB 1394 的动向	

汽车车上网络的作用是简化汽车电气电子设备的线路连接、降低线束重量、增强汽车性能、为整车电气功能的扩展提供便利条件、提高电气电子系统的可靠性和故障诊断水平、实现电气电子设备之间的信息共享、与外界进行信息交换等。

在表 1.1-2 中,车内控制网络是按美国汽车工程师协会(Society of Automotive Engineer, SAE)于 20 世纪 90 年代中期对车用网络所分的 A、B、C 三级(类)来描述的。其中,LIN 为局部互联网络(Local Interconnect Network);TTP/A 为 SAE A 级(类)时间触发协议(Time Triggered Protocol SAE Class A);CAN A、CAN B 分别为 SAE A、SAE B 级(类)控制器局域网(Controller Area Network),即低速 CAN,作为国际标准 ISO 11519—2;SAE J1850 为 SAE 于 1994 年正式确定的 B 类网络标准协议(这之前,它作为 SAE

推荐的协议已被使用了 7 年);VAN 为交通工具局域网(Vehicle Area Network),作为国际标准 ISO 11519—3;CAN C 为 SAE C 级(类)CAN,即高速 CAN,作为国际标准 ISO 11898—2,通信速率为 125kbit/s~1Mbit/s;SAE J1939 为 SAE 确定的基于 CAN 的用于卡车和客车的高层协议;TTCAN 为时间触发 CAN(Time Triggered CAN);TTP/C 为 SAE C 级(类)时间触发协议;FlexRay 是一种为车上应用系统和线控系统(X-by-wire)所开发的通信网络,由 BMW、Daimler Chrysler、Philips Semiconductors、Motorola 和 Bosch 等几大汽车公司和半导体公司成立的 FlexRay 共同体(FlexRay Consortium)所支持;Byteflight 是由 BMW、Motorola、ELMOS 等公司提出的高速汽车网络协议,BMW 7 系列上使用了基于 Byteflight 协议的网络系统,用于车上被动安全系统相关 ECU 和 Shift-by-wire(线控换挡系统);TTP/C

最初是由维也纳大学开发的用于实时分布式系统的网络协议, Audi、Volkswagen 和 Delphi 等公司选用其作为下一代汽车线控系统的网络标准, 并形成了 TTP/C 共同体 (Honeywell 是这个共同体中的电子器件生产公司)。TTCAN、FlexRay、Bytflight 和 TTP/C 均为基于时间触发的网络, 可用于高可靠性、高实时性 (可预测时间特性) 的线控系统/安全性控制, 如 Drive-by-wire (线控驾驶系统)、Brake-by-wire (线控制动系统)、Steering-by-wire (线控转向系统) 等。

在车载信息网络中, DDB/Optical 为光通信家庭数字总线 (Domestic Digital Bus/Optical); MOST 为媒体定向系统传输 (Media Oriented System Transport), 已被 BMW 7 系列、Daimler Chrysler 公司 E 系列所采用, Audi 的 A8、Volvo 的 XC90 也将采用; IDB 1394 即来自于 IEEE 1394 的智能交通系统数据总线 (ITS Data Bus) 1394, 能最大限度地利用民用设备市场, 可望在汽车信息系统中获得较多的应用。

除上述提到的汽车网络外, 还有用于汽车故障诊断的网络, 如 KWP2000 (Keyword Protocol2000)。

在对汽车本身的性能有重要影响的车内控制网络中, 应用最广的是 CAN 和 LIN。下面对 CAN 和 LIN 的技术特点进行简要介绍。

2.5.1 CAN 的技术特点

CAN 已经在汽车车身和动力传动控制系统的应用中获得了巨大成功。CAN 采用了许多新技术及独特的设计, 具有突出的可靠性、实时性和灵活性, 其技术特点如下:

(1) CAN 从本质上讲是一种多主或对等网络, 网络上任一节点均可主动发送报文 (报文能否发送到总线上取决于总线是否空闲和报文的优先级)。

(2) 废除了传统的站地址编码, 而代之以对通信数据进行编码; 通过报文过滤, 可实现点对点、多点播送 (多点传送)、广播等几种数据传送方式。

(3) 采用短帧结构 [对于标准格式的数据帧, 最短为 44 位, 最长为 108 位 (不计填充位)], 传输时间短, 受干扰概率低。

(4) 具有多种检错措施及相应的处理功能 (位错误和位填充错误检测、CRC 校验、报文格式检查和应答错误检测及相应的错误处理), 检错效果极好, 处理功能很强, 保证了通信的高可靠性。

(5) 通信介质 (媒体) 可为双绞线、同轴电缆或光纤, 选择灵活。

(6) 总线长度可达 10km (通信速率为 5kbit/s 及其以下); 通信速度可达 1Mbit/s (总线长度为 40m 及其以下)。

(7) 网络上的节点数主要取决于总线驱动电路, 可达 110 个; 标准格式的报文标识符 (11 位) 可达 2032 个 (标识 ID10~ID0 中的 ID10~ID4 不能全为“隐性”, 即不能使用标识符 2 进制模式 ID=1111111XXXX (X 表示任意电平位), 故可使用的不同的标识符的数目为 $2^{11}-2^4=2032$, 而扩展格式的报文标识符 (29 位) 的个数几乎不受限制。

(8) 通过报文标识符来定义节点报文的优先级。对于实时性要求不同的节点报文, 可定义不同级别的优先级, 从而保证高优先级的节点报文得到优先发送。

(9) 采用非破坏性逐位仲裁机制来解决总线访问冲突, 当多个节点同时开始向总线发送报文时, 通过逐一比较发送位与监听到的位, 发送较低优先级报文的节点会主动停止发

送, 而发送最高优先级报文的节点会不受任何影响地继续发送, 从而使总线冲突仲裁时间降至最低。采用这种非破坏性逐位仲裁机制, 即使在网络负载很重时, 也不会出现网络瘫痪现象。

(10) 发生严重错误的节点具有自动关闭输出的功能, 即从逻辑上自动脱离总线, 以使总线上其他节点的通信能够继续进行。

顺便指出, CAN 最初虽然是为汽车的监测、控制系统而设计的, 但由于它在性能、可靠性等方面的突出优势, 现已广泛应用于航天、电力、石化、冶金、纺织、造纸、仓储等行业, 如在自动化仪表、智能传感器、数控机床、医疗器械、机器人、楼宇自动化装置、火车、轮船等元件、设备、设施中, CAN 都得到了良好的应用。

2.5.2 LIN 的技术特点

LIN 是一种通用的、串行低成本汽车网络, 它能有效地简化现有的低端复合解决方案, 并可以进一步削减汽车电子控制系统的开发、生产、服务及后勤成本。它的使用范围是带单主机节点和一组从机节点的 A 类多点总线。LIN 的主要技术特性为:

- (1) 单主机多从机概念, 无需仲裁机制。
- (2) 基于普通 UART/SCI 接口的低成本硬件实现, 低成本软件或作为纯状态机。
- (3) 从机节点不需石英或陶瓷谐振器即可实现自同步。
- (4) 确定性信号传输, 信号传播时间可预先计算。
- (5) 低成本的单线设备, 遵从国际标准 ISO 9141 的规定。
- (6) 通信速率最高可达 20kbit/s。
- (7) 通常一个网络上节点数目最多为 16 个, 共有 64 个标识符 (0x00, 0x01, ..., 0x3F)。
- (8) 总线通信距离最大为 40m。
- (9) 不需改变 LIN 从机节点的硬件和软件就可以在网络上增加节点。

LIN 的典型应用是汽车中的车身控制单元, 如车门、车顶、座椅、空调、照明和温湿度传感器等。对于这些比较敏感的单元, LIN 可以使诸如智能传感器、制动器或光敏元件等机械元件得到较广泛的应用。这些元件可以很容易地连接到汽车网络中, 且维护和服务十分方便。基于 LIN—CAN 的车门系统如图 1.1-34 所示。

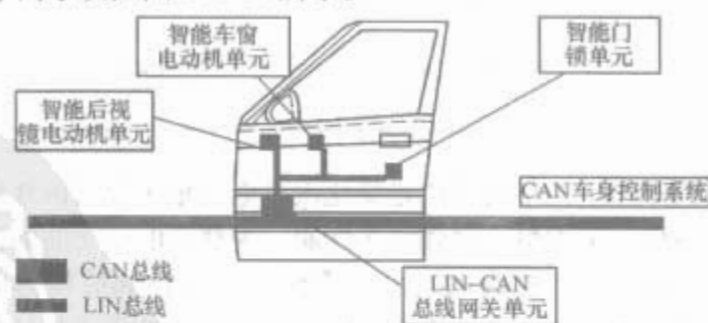


图 1.1-34 车门系统示意图

通过图 1.1-34 可以看到, 车身网络的核心——CAN 通过一个 LIN—CAN 网关单元与车门系统相连。网关另一侧的 LIN 网络连接门锁单元、后视镜电机单元、车窗电机单元等低速设备。作为 CAN 的辅助网络, LIN 总线与 CAN 总线的关系是互补的。LIN 总线可作为两级总线的第二级, 而 CAN 总线可作为第一级主干总线。两级总线通过作为网关的 LIN 主机节点进行连接、通信。这样, 整个车身系统便构成了一个层次化网络, 实现了真正的分布式控制, 从而使网络连接的优点得到最大限度的发挥。

除在汽车行业中的应用外, LIN 还可广泛用于仪表、开关、小型电机及大众消费电子产品中。

2.6 汽车电机系统的组成与功能

2.6.1 汽车电机的功能

电机在汽车中的应用非常广泛, 据统计, 每辆普通汽车至少要使用 15 台电机, 高级轿车要用 40~50 台电机, 而豪华型轿车则配有 70~80 甚至上百台电机。电机在汽车中发挥了重要的作用。电动汽车采用电动机作驱动, 使整个车辆运转起来, 在这里, 电机是车辆动力系统的核心。车用发电机也是一种电机, 用于给车载电气设备提供电能。起动机中亦有电机, 没有起动机, 发动机就不能起动, 或起动变得非常困难。发展趋势是将起动机与发电机合成一体, 即集成起动发电机, 不仅具有起动机和发电机的功能, 而且还可以与发动机一起构成混合动力系统, 节省燃料, 减少排放。在电控无级变速器系统中, 调节电动机是实现变速比平滑可调的关键零部件之一。电控无级变速器多采用永磁直流电动机作为调节电动机。除此之外, 汽车的门、窗、雨刷、燃油泵、电动天窗、电动座椅、音响产品等都需要电动机来调节, 空调中的风机也是由电机来带动, 汽车天线也要由电动机驱动升降。在发动机、底盘的阀门、节气门和速度表中应用了永磁步进电动机, 在电动助力转向系统中还应用了旋转变压器和无刷力矩电动机。

这些车用电机为了适应汽车电源电压及有限的空间和移动的环境, 需要具有以下特点:

(1) 低电压、大电流。汽车上的电源由发动机驱动的交流发电机与蓄电池构成, 电压一般为直流 12V 或 24V, 因此汽车电机大部分是低电压的直流电动机, 其工作电流都较大。

(2) 工作电压波动大。汽车上使用了种类繁多的电气设备, 在不同时间内和不同工况下电源电压变化范围大, 要求电机能在电源电压在 8~16V 范围内变化时正常工作。

(3) 环境条件苛刻。汽车电机与工业用、家用电器用电机相比, 环境条件更为苛刻, 应满足耐热、耐冲击振动、防水、防腐蚀等要求, 能在环境 ($-40\sim 80$) $^{\circ}\text{C}$ 下正常工作。例如在四轮操纵系统中使用的混合式步进电动机, 由于安装在汽车底盘上, 因此要求耐振动 6g、耐冲击 150g, 并在结构上采取防水和通风的措施。

(4) 有消除无线电干扰的措施。直流电动机因换向器和电刷摩擦产生的火花会造成无线电干扰, 因此必须采取消除干扰的措施, 如接入滤波电容器等。

(5) 效率高、比功率大。随着耗电量的增加, 发动机的负载亦增加。有文献报道, 当耗电量增加 10W 时, 汽车的耗油成本增加 0.3%~0.6%。为了节约耗油量, 就要求汽车电机效率高、比功率大。

2.6.2 汽车电机的分类

电机是利用电磁感应原理工作的机械, 分类方法也很多。按有无换向器, 电动机可分为两大类, 即有换向器电动机和无换向器电动机: 前者有换向器组件, 如直流电动机、永磁直流电动机等; 后者无换向器组件, 如感应电动机、永磁同步电动机、开关磁阻电动机等。有换向器电动机控制技术简单成熟, 但由于换向器或电刷的存在, 使得其可靠性降低; 无换向器电动机效率和功率密度都较高, 可靠耐用, 但控制较复杂。电机也可以按用途分类, 即驱动用电机和控制用电机两大类: 驱动用电机的主要任务是进行能量转换, 用来驱动各种机构、仪表及各种电器, 通常单独使用; 控制用

电机主要完成信号的传递和转换。根据在控制系统中的作用, 又可将控制用电机分为测量元件和执行元件: 测量元件能够将转角、转角差和转速等机械信号转换为电信号; 执行元件能够将电信号转换成轴上的角位移或角速度以及直线位移和线速度, 并带动控制对象运动。

汽车电机一般亦可按用途分类: 驱动用电机, 如电动汽车驱动用电机、起动机、发电机、变速器的调节用电机以及液压系统中的液压泵电机等, 它们传输的功率和电力都较大; 控制用电机, 如旋转变压器、测速发电机、步进电机等, 它们传输的功率通常均较小, 主要用来完成电信号和机械信号的相互传递和转换。应注意的是, 这种分类方法是相对的, 而不是绝对的。

2.6.3 汽车电机系统的组成

一般认为, 电机系统——电机及其驱动控制系统由电动机、功率变换单元、传感器和控制器这四部分组成。20 世纪 80 年代之前, 电机控制都是由模拟电路来实现的。现代电机控制系统几乎全部采用基于微处理器的全数字控制系统。电机系统中, 电动机是被控对象, 微控制器起控制器的作用, 对给定、反馈等输入进行加工, 按照选定的控制规律形成控制指令, 输出数字控制信号。输出的数字量信号有的经放大后可直接驱动诸如电力电子装置的数字脉冲触发部件, 有的则要经 D/A 转换变成模拟量, 再经放大后对电机有关量进行调节控制。系统采用闭环控制时, 反馈量由传感器检测。若传感器输出的是模拟量, 则需经采样、保持处理后再经 A/D 变换成数字量送入微控制器; 若传感器输出的是数字量, 则可经整形、光耦隔离处理后直接送入微控制器。电机运行的给定控制参数和运行指令可以通过键盘、拨盘、按钮等输入设备送入, 电机运行的数据、状态可通过显示、打印等输出设备得到及时反映。

在微控制器控制的电机系统中, 输入微控制器的信号一般有助于频率或转速设定的运行指令, 用于闭环控制和过流、过压保护的电机系统电流、电压反馈量, 用作转速、位置闭环控制的电机转速、转角信号, 用于缺相或瞬时停电保护的交流电源电压采样信号等。由微控制器输出的信号主要有功率半导体元件的触发信号, 用于控制输出电压、电流幅值、频率和相位的信号, 电机系统的运行和故障状态指示信号, 以及与上位机或系统进行信息交换的通信信号等。

3 汽车电气电子技术的发展

3.1 汽车电气电子技术的初期和近期发展历程

第一批应用到汽车中的电器设备就是点火系统, 比如在奔驰汽车中就是利用电池和感应线圈等组成的电点火装置作为点火系统。后来又出现了前灯、起动机和其他电器设备。在汽车中应用电子技术本身是在 20 世纪 30 年代从电子管汽车收音机的出现开始的。

但是, 由于电子管耐震动性差, 且需占用许多空间和消耗许多电能, 因此电子管应用在汽车上是很不适合的, 所以它没有在汽车中得到普及。

1948 年发明了晶体管, 1958 年出现了集成电路, 但是, 直到 1960 年它们才开始在汽车中得到应用。

应用在汽车技术中的第一批半导体器件是硅二极管, 它们被用来作为交流发电机电压整流器。然后在电压调节器和点火系统中应用功率三极管来代替电器触点。这大大改善了汽车的参数和可靠性。

续表

年份与事件	技术和工 艺的发展	发动机和传动系控制		行驶系控制		驾驶室设备控制	
		日 本	其他国家	日 本	其他国家	日 本	其他国家
1975 限制燃料消耗 (1976)	单片 8 位微机 INTEL-8048	喷射控制(L 型) (丰田、尼桑)	点火时刻模拟控 制系统(克莱斯勒)				
1976	VLSI 16K 位 RAM	IC 电压调节器 (丰田)	点火时刻微处理 器控制系统 MISAR (通用)			晶体管控制转 向指示器(丰田)	
1977 排气成分限制 (1978)		具有负反馈系统 和氧传感器的喷射 控制(丰田、尼桑)	发动机综合控制 系统 EEC-I (福特) 爆燃控制器(通 用)		汽车离地高度 控制(通用)		车用信息-计算 系统(通用)
1978 燃料定量 消耗限制 加利福尼亚, 美国 (1978~1983) 美国节约 燃料规定	VLSI 64K 位 RAM	气化器控制(尼 桑)	发动机综合控制 系统 EEC-II (福特)		四轮闭锁解除 (波许)		无钥匙进入汽 车系统(福特)
1979 第二次石 油危机	VLSI 16 位中 央处 理 器 (IN- TEL-8086)	发动机综合控制 系统 ECCS(尼桑)	发动机综合控制 系统 EEC-III (福特) 气化器发动机综 合控制系统 C4(通 用) 集中喷射控制(通 用、福特)				
1980		发动机综合控制 系统 TCCS(丰田) 爆燃控制器(尼 桑、丰田) 具有光型空气传 感器的喷射控制 ECI(三菱)	汽缸隔断控制(通 用) 发动机综合控制 系统 C3(通用)	汽车离地高度 控制(尼桑)		碰撞声音告警 系统(丰田) 导航系统(三 菱)	
1981 稳定石油供应 日本自动限制 向美国的出口		具有风速传感器的 喷射控制 I-TEC (五十铃) 传动系控制(微 机)(丰田) 节流器 ERS(丰 田)		给定速度保持 装置(微机)(丰 田) 悬架控制(丰 田、尼桑) 四轮闭锁解除		仪表电子控制 盘(丰田) 导向系统(丰 田、尼桑) 微机空调器(丰 田) 多路通信(光纤 通信)(尼桑)	安全气囊(奔 驰)
1982		发动机汽缸切换 (三菱) 喷射控制系统 PGM-EI 柴油机控制系统 (丰田、五十铃) 车轮防滑扭矩控 制(三菱)	具有 16 位中央处 理器的发动机综合 控制系统 EEC-IV (福特)	悬架控制(马自 达)		多路通信(光纤 通信)(丰田) 背后障碍物觉 察装置(背后声波 定位)(丰田) 座位位置改变 控制(尼桑) 液晶仪表盘(三 菱) 司机口令识别 (尼桑)	

续表

年份与事件	技术和工艺的发展	发动机和传动系控制		行驶系控制		驾驶室设备控制	
		日 本	其他国家	日 本	其他国家	日 本	其他国家
1983 日本集成电路产量达 10 亿片	VLSI 256K 位 RAM 16 位微机 INTEL-8096(单片)	涡轮增压控制(五十铃) 发动机和传动系综合控制系统(丰田)	发动机和传动系综合控制系统(宝马)	悬架综合控制(三菱)	悬架控制(通用)	对残渣敏感的玻璃自动清洁器(尼桑) 无钥匙进入汽车系统(尼桑) 道路信息系统(尼桑)	
1984	CMOS VLSI 32 位中央处理器 MC68020(摩托罗拉)	贫油混合物燃烧控制 T-LCS(丰田) 火花放电时间控制(等离子点火)(尼桑) 传动系控制系统 NAVI-5(五十铃)	点火控制系统 C ³ I(通用)	悬架控制(尼桑)		彩色液晶仪表盘(丰田)	汽车用计算机(通用)
1985 国际科技展览会	VLSI 1M 位 RAM	点火控制系统(丰田) 点火控制系统(尼桑) 增压控制系统 Super charger (丰田) 具有负反馈的柴油机点火控制系统(丰田) 具有光型空气消耗量传感器的喷射控制系统(丰田)		后轮转向控制系统 HICAS(尼桑)	四主动轮扭矩控制系统	全彩色显示屏(丰田) 具有给定特性的转向控制(丰田)	

3.2 汽车电气电子技术的现状

在现阶段，开始使用 32 位微处理器，主要侧重于汽车性能的进一步提高、各种功能的进一步完善和汽车质量的减小。对于图 1.1-1 中汽车电气系统和电子信息系统，主要产品有属于发动机和传动系电子控制系统的动力最优化控制系统；属于底盘电子控制系统的四轮转向控制系统、电动助力转向控制、驱动防滑系统、制动力分配、电子差速锁、电子感应制动系统、巡航控制系统、轮胎气压监控系统；属于车身电子控制系统的智能型安全气囊、防撞控制系统、倒车警示器、超速限制器、电子门锁控制、智能化自适应前照灯系统、道路状态指示器、故障自诊断系统、自动空调系统、自动车窗和座椅调节系统、可热式挡风玻璃、自动后视镜系统；属于汽车电子信息系统的数字式油压表、信息显示系统、语音合成与识别系统、蜂窝式电话或汽车电话、导航系统、自动驾驶系统和电子地图、通信与导航协调系统、安全驾驶检测与协调系统等。

智能交通系统(ITS)是 20 世纪 80 年代末开始发展起来的。欧洲、北美和日本相继成立了许多机构，制定并实施了开发计划。1986 年，欧洲成立了欧洲共同体交通信息与控制组织(ERTICO)，启动了智能交通系统研究的第一批项目；以车辆的研究开发为主体的 PROMETHEUS 研究计划和以道路基础设施开发为主题的 DRIVE 研究计划。1989～1991 年的 DRIVE I，以基础研究和标准化为主要研究内容，分成模型和一般问题、安全和人的行为分析、交通控制

和其他四个研究领域、72 个研究题目。继 DRIVE I 之后，欧洲于 1992～1994 年又完成了 DRIVE II。近年来，欧盟 ITS 的主要研究工作包括 T-TAP 计划(1994～1998 年)和 TEN-T 计划(1995～1999 年)；于 1998 年 4 月开始了代号为 KAREN 项目，进行欧盟智能交通系统体系结构的开发，并于 1999 年 8 月和 10 月分别推出了其逻辑体系结构和物理体系结构。

20 世纪 80 年代末，日本的路车交通智能协会 VERTIS 即现在的 ITS Japan 开始了 RACS 实验研究，其后美国智能交通系统协会开始启动 PATHFINDER 和“2000 年的交通模式”研究项目。1996 年 7 月，日本 5 个政府机构联合制定发表了“关于推进智能交通系统的整体构想”，它成了日本 ITS 工作的主体计划，并制定了 9 个开发领域和 20 项服务内容，近几年，又增加了一项新的内容，即高度信息通信社会相关信息的利用。日本 ITS 的总计 21 个用户服务，被分为 56 个特定的用户服务，再细分为 177 个子服务，从而形成一个包括发展领域、用户服务、特定的用户服务和子服务等 4 个层次的系统服务结构。根据美国国家智能交通系统体系，美国智能交通系统的研究内容包括 7 个基本系统(大系统)、29 个用户服务功能(子系统)以及 60 个市场包，它们共同构成了未来美国智能交通系统的研究领域。

我国国家科技部于 2000 年初组织相关领域专家成立了 ITS 专家组，基于“九五”国家科技攻关项目“中国 ITS 体系框架研究”，采用面向过程的方法，起草了“中国智能交通系统体系框架”。我国 ITS 的体系框架共分为 8 个服务领域、

34 项服务内容、138 项子服务。

除上述国家外,还有一些国家也开始了 ITS 的开发和研究,如韩国由交通部牵头制定了全面的 ITS 框架结构和发展计划,新加坡已经在全国开始推行不停车收费,中东的一些国家也开始讨论本国 ITS 的研究计划。各国各地区对 ITS 的研究领域和侧重点有所不同。

国际标准化组织的智能交通系统技术委员会为 ISO/TC 204。

严格地讲,网络通信技术在汽车上的应用始于 20 世纪 80 年代初。1981 年、1982 年尼桑、丰田汽车分别采用了多路通信(光纤通信)。但总的说来,在 1985 年以前,汽车车上网络的应用非常有限。从 1986 年开始,随着 CAN(Bosch 公司 1983 年开始研究)的开发成功,汽车车上网络获得了较快的发展和广泛的应用。现在,CAN 和 LIN 是主流车上网络。

3.3 汽车电气电子技术的发展趋势

目前,平均每辆汽车上的电子装备已占整车成本的 20%~30%;一些高档轿车上的微处理器数量已经达到 50 个左右,电子产品的费用已占整车成本的 50%以上。随着汽车电气电子产品所占比例的不提高,汽车电气电子技术的发展趋势是系统集成化、信息化、网络化、智能化,主要表现在以下几个方面:

3.3.1 采用双电压 14V/42V 系统

随着汽车电气电子设备的不断增多,用电功率持续增加,现在的 14V 供电系统提供的功率已经越来越难以满足实际发展的需要,因此采用双电压 14V/42V 系统就成了汽车供电系统的一种发展趋势。在典型的双电压 14V/42V 系统中,42V 系统向电动空调压缩机、电动刹车、电动发动机网、电动转向、电控悬架等系统供电;14V 系统向前大灯、尾灯、后视镜、电动门窗、雨刮器、风扇电机、燃油喷射系统等供电。

3.3.2 汽车车上网络的应用更加广泛

在 1955 年,平均一辆汽车所用线束的总长度为 45m;而到了 2005 年,为了提高汽车的性能,汽车上装备了大量的电气电子设备,使得平均一辆汽车所用线束的总长度达到了 4km。线束的增加不但占据了车内的有效空间、增加了装配和维修的难度、提高了整车成本,而且妨碍整车可靠性的提高和功能的扩展。应用汽车车上网络可以解决这些问题。

推动汽车车上网络大力发展和广泛应用的另一个重要因素是智能交通系统的发展和应用。在智能交通系统中,一个汽车应具有接收和提供相关信息的功能,如接收定位信号、提供地理信息服务、接收管理信息、发送本车状态信息、进行安全服务请求等;未来汽车可作为互联网上的一个或多个终端,汽车可以提供任何在办公室或家庭中的网络信息服务。要完成这些功能,需要很强的通信能力、数据共享功能,这就会大大促进汽车车上网络的应用。

在汽车行业中存在许多网络通信协议,由于缺乏全世界统一的标准,实际上提高了汽车的制造成本。不过,在汽车制造商和供应商之间已逐渐达成一致的是:A 类网络使用 LIN、B 类网络使用低速 CAN、C 类网络使用高速 CAN 已作为事实上的统一标准;在采用 X-by-wire 技术的下一代汽车中,TTCAN、TTP/C 或 FlexRay 协议将是一种可能的选择。

3.3.3 线控技术逐步应用

线控概念(X-by-wire)是一种新的汽车工程概念。X-by-

wire 技术——线控技术是十分重要的技术,该技术可极大地改善汽车的可操纵性、安全性、设计的灵活度及总体结构等。应用线控技术,汽车的操纵系统、制动系统及其他辅助系统均可通过电子方式进行控制,即汽车内的刚性传动件将会被基于网络控制的各种传感器、控制器和电液式(电动式)执行器所组成的线控系统所取代。线控系统有 Shift-by-wire、Drive-by-wire、Brake-by-wire、Steering-by-wire 等。应用于线控系统的汽车网络须是高速、实时、容错性的网络,如 TTCAN、FlexRay、Byteflight 和 TTP/C 等。

3.3.4 智能交通系统不断发展和应用

智能交通系统尚处于发展之中,以后智能交通系统会进一步得到发展,并通过不断试验与完善,最终获得实际应用。到那时,乘车出行将变得十分方便和愉快。

3.3.5 汽车电机更加适应现代汽车的需要

为满足现代汽车对电机提出的不断提高的要求,汽车电机技术必须向轻薄短小化、高效化、无刷化、控制 DSP 化发展,还要为适应双电压系统而开发新一代电机系统。

(1) 轻薄短小化。汽车电机的形状正向着扁平、盘式、轻巧和短小的方向发展,以适应汽车特定环境的需要。为了缩小外形尺寸,首先考虑采用高性能的钕铁硼永磁材料。例如一台 1000W 铁氧体起动机磁钢(永久磁铁)质量为 220g,若用钕铁硼磁钢则质量仅为 68g。采用将起动机和发电机设计成一体方案,比分离的质量减轻一半。已开发出盘式的线绕转子和印制绕组转子的直流永磁电动机,也可应用于发动机水箱和空调器冷凝器的冷却通风。扁平式的永磁步进电动机可应用于汽车速度表、计价器等多种电子设备中。日本又推出了超薄形离心式风扇电动机,厚度仅为 20mm,可以安装在框架壁面很小的场合中作通风冷却用。

(2) 高效化。比如对于刮水器电机,通过对减速器结构的改进,可减少电机轴承上的负荷 95%,体积缩小、质量减轻 36%、电机转矩提高 25%。大多数汽车电机采用铁氧体磁钢,随着钕铁硼磁钢性价比的提高,钕铁硼磁钢将替代铁氧体磁钢,从而使汽车电机更轻量化、高效化。

(3) 无刷化。按照汽车控制与驱动自动化和降低故障率、消除无线电干扰等要求,在高性能永磁材料和电力电子技术、微电子技术的支撑下,汽车中大量应用的各种规格永磁直流电动机将向无刷化方向发展。

(4) 电机控制数字信号处理器(DSP)化。在高级、豪华的轿车中发动机控制、防滑制动控制、转向控制、车辆高度控制、速度自动变换控制等系统中,都应用了由 DSP 控制的微型特种电机,有的将电子控制部分安装在电动机的端盖内,使控制单元和电动机一体化。

(5) 适应双电压系统需求化。由于汽车将使用双电压 14V/42V 系统,因此汽车微型特种电机必须适应双电压系统,及早开发相应的各种微型特种电机。

4 汽车电气系统的特点

4.1 双电源

绝大部分汽车上都使用双电源,即发电机和蓄电池。发电机是汽车的主要电源,蓄电池是汽车的辅助电源。蓄电池与发电机并联。

4.2 低压

汽车电系的标称电压有 12V、24V 两种,汽油车普遍采用 12V 系统,而重型柴油车多采用 24V 系统。对发电装置,

12V系统的额定电压为14V, 24V系统的额定电压为28V。低压系统的优点主要是安全性好, 蓄电池单格数少, 对减少蓄电池质量和尺寸有利, 所用白炽灯的灯丝较粗, 寿命较长。

随着汽车车载电气和电子设备用电功率的不断增长, 现有汽车供电系统提供的功率可能无法满足实际需要, 汽车供电系统的供电电压有可能提高到42V, 或14V/42V混合供电。

4.3 直流

汽车采用直流系统的原因是, 发动机要靠电力起动机启动, 起动机由提供直流电压的蓄电池供电, 而蓄电池的电能被消耗后又必须用直流电充电, 因此汽车电气系统为一直流系统。

4.4 部分单线制

单线制是指电源的正极(或负极)通过一根导线与各用电设备连接, 而电源的负极(或正极)直接和汽车底盘、发动机等金属机体(车体金属部分)相连, 从而省去了一根用电设备的回路导线。由于单线制节省导线, 线路简化清晰, 安装和检修方便, 且电气机件也不需要与车体绝缘, 因此汽车电系大多采用单线制, 但也有双线制的成分, 即所谓部分单线制, 如电压调节器电路, 为保证其调压性能, 其负极就是用单独的电线直接与发电机的负极相连。现代汽车电系的许多电路(包括电子控制系统的电路), 要求供电更可靠。为此, 设计师就将它们设计成双线制。随着汽车电气电子技术的发展, 汽车电系的双线制成分将有一定程度的增加。

4.5 负极搭铁

采用单线制时, 蓄电池的一个电极接到车体上, 俗称“搭铁”。若蓄电池的负极与车体相接, 就称负极搭铁; 反之, 为正极搭铁。按照我国国家标准规定, 国产汽车电气系统均采用负极搭铁。

5 新型汽车及相关电气电子技术

5.1 电动汽车

电动汽车是以电力作能源、由电动机驱动的机动车辆。早在1834年, Thomas Davenport就已制造了一辆电动三轮车。但是, 现代电动汽车完全不同于传统的电动汽车, 它不仅是运输车辆, 而且是一台全新的电气设备。现代电动汽车的概念可归纳为以下几点:

- (1) 电动汽车是以电驱动为基础的机动车辆, 电驱动由电动机、功率转换器以及电源组成, 有其独特的特点。
- (2) 电动汽车不仅是一辆车, 而且是实现清洁、高效道路运输的一个全新的系统。
- (3) 电动汽车系统是一个便于和现代交通网络结合的智能系统。
- (4) 电动汽车的设计是工程和艺术的结合。
- (5) 必须另行定义电动汽车的工作条件和工况循环。
- (6) 必须对用户对于电动汽车的期望进行调研, 这样才能对用户进行适当的有关电动汽车知识的教育。

电动汽车的系统结构和工作原理完全不同于燃油汽车。电动汽车结构系统由机械子系统、电力和电子子系统以及信息子系统组成。机械子系统由底盘和车身、驱动装置、变速器以及电源箱体组成, 与之相关的因素包括道路特性、防撞

性、汽车的内部空间、装配时间、适用性以及价格。电力电子子系统由动力网、电动机、控制器和能源系统组成, 与之相关的因素有安全、规则、标准、效率、可靠性、重量以及价格。信息系统用于处理司机的意愿, 并监控汽车的运行、电源、电动机、控制器和充电器的状态, 相关的因素有通信网络、数据处理的算法以及和通信相关的故障诊断和充电控制。

5.1.1 电动汽车的发展历史

1834年, Thomas Davenport制造了一辆电动三轮车, 它由一组不可充电的干电池驱动, 但只能行驶一小段距离。四年后, Robert Davidson也造了一辆用干电池驱动的电动机车。1881年出现了世界上第一辆以可充电电池为动力的电动汽车, 它是法国工程师Gustave Trouve装配的以铅酸电池为动力的三轮车。1886年, Frank Sprague设计生产了有轨电车, 电动汽车变得流行起来。在当时的美国, 每年销售的4200辆汽车中有38%是电动汽车, 22%是燃油汽车, 40%是蒸汽机汽车。

19世纪末, 许多美国、英国和法国的公司都开始生产电动汽车。最早的电动汽车制造厂是由Morris和Salom拥有的电动客车和货车公司。另一个比较早的电动汽车生产商是Pope制造公司, 到1898年底, Pope造了大约500辆Columbia型电动汽车。除了美国电动汽车制造厂外, 英国的伦敦电动出租汽车公司1897年生产了15辆电动出租车, 法国的BGS公司在1899~1906年也生产了几种不同类型的商用型电动汽车, 包括小汽车、货车、客车和豪华轿车。1900年之前, BGS公司的电动汽车一直保持着世界电动汽车行驶里程的最高纪录, 其续驶里程约达290km。第一辆速度超过100km/h的汽车是电动汽车, 即“永不满足”, 它是一辆子弹头式的电动赛车, 在1899年5月创下了速度为110km/h的记录。

到1912年, 美国有34 000辆电动汽车注册。1899~1916年期间, Baker电气公司一直是美国最重要的电动汽车制造厂之一。1901~1920年, 英国伦敦电动汽车公司生产了后轮轮毂电机式、后轮驱动、斜轮转向和充气轮胎的电动汽车。1907~1938年期间, 底特律电气公司生产的电动汽车不仅具有无噪声、清洁可靠的优点, 而且最高时速达到40km/h, 续驶里程为129km。

随着燃油汽车的大规模生产及推广使用, 到20世纪30年代, 电动汽车几乎消失了。

20世纪70年代的能源危机和石油短缺使得电动汽车重新获得生机。世界上很多国家如美国、英国、法国等都开始研发电动汽车。但是之后, 能源危机和石油短缺变得不再严重, 电动汽车在经历了短暂的发展时期后又进入了低谷。

20世纪80年代, 节能和环保的要求使得电动汽车的发展再次获得生机。在世界范围内, 尤其在美国、日本和欧洲, 许多汽车生产商开始生产电动汽车或者涉及电动汽车领域。美国的通用、福特、克莱斯勒、美国电动汽车公司以及Solectria在电动汽车的发展中起着很重要的作用。日本几乎所有的汽车生产商, 如丰田、尼桑、本田、马自达、大发、三菱、铃木、五十铃汽车公司等都制定了自己的商业化电动汽车的发展计划。欧洲的许多国家, 尤其是法国、德国、意大利和英国都发起了进入电动汽车市场的电动汽车发展计划, 其中较活跃的汽车公司有雪铁龙、雷诺、宝马、奔驰、奥迪、沃尔沃、大众、欧宝、菲亚特等。除了汽车生产商以外, 还有一些电力公司和电池生产商在电动汽车的示范中也起着积极的作用。另外, 一些研究所和大学不断研究电动汽

车新技术,以使电动汽车能与燃油汽车相竞争。

5.1.2 电动汽车的发展动态

5.1.2.1 国外电动汽车的发展动态

通用汽车公司从1916年开始从事电动汽车研发。通用汽车公司做了大量实验性电动汽车,如1966年的Electrovair,1968年的Electrovan和Stir-LeeI,1969年的Series512和1979年的Electrvett等。1990年1月生产出第一辆定型的电动汽车Impact,其性能能够和今天的燃油汽车相媲美。1993年通用汽车公司开始试生产Impact3型电动汽车,它是1990年Impact的改进产品。1997年,通用公司开发出具有最先进动力系统的双座EV1电动汽车,该车为前轮驱动,采用一台102kW的三相感应电动机、双级减速单速驱动桥、26个阀控铅酸电池组成的电池组作动力,最高车速达128km/h,0~96km/h加速时间小于9s。近年来,通用汽车公司致力于混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车的研制。1998年1月,通用汽车公司发布了将2座电动汽车EV1变为4座燃料电池电动汽车的试制车,同时发布了同为4座的并联混合和串联混合电动汽车的原型车,并仍旧使用EV1的前轮驱动装置。另外,通用公司研制的另一辆混合动力电动汽车Precept为双轴可再生制动的混合动力驱动系统,前轮采用电力驱动,后轮采用混合动力驱动。1998年9月,通用发布了燃料电池电动汽车Zafira,采用储存在低温燃料箱的液态氢作燃料,三相感应电动机前轮驱动,最高时速120km/h,0~100km/h加速时间约20s。2002年,通用汽车公司推出了燃料电池概念车Autonomy,它是第一款将燃料电池与线控技术相结合的车型。

20世纪60年代初,福特公司开始涉及现代电动汽车的研发,并实施了许多电动汽车的研发项目,如20世纪60年代后期研制出的Cortina Station Wagon电动汽车、70年代的Econoline Van混合动力电动汽车、80年代的Fiesta和Escort电动汽车以及ETX-I(LN7)和EXT-II(Aerosar)型电动汽车。20世纪90年代福特公司所展示的Ecostar是以欧洲福特公司的Escort Van电动汽车技术为基础开发的。2000年初,福特发布了5座、4门并联混合动力电动汽车Prodigy,该车采用55kW柴油发动机及35kW具有集起动机和发电机功能为一体的电动机为动力,燃油经济性达到33.2km/L,续驶里程为1056km。福特公司于1998年发布了装备压缩氢气和Mark700燃料电池的P2000HFC燃料电池电动汽车。该车质量为1514kg,采用67kW三相交流感应电动机作驱动,3个25kW燃料电池作动力,最高等效燃油经济性为33.6km/L,0~100km/h加速时间为12.3s,最高速度128km/h,续驶里程约为160km。2000年1月,福特公司发布了在FordFocus上搭载燃料电池的Think FC5燃料电池电动汽车。该车带有甲醇改质器,燃料电池采用加拿大巴拉德公司的Mark900,续驶里程增大到250km,0~100km/h的加速时间小于14s。

丰田汽车公司从1971年开始研制电动汽车。1983~1989年期间,丰田公司研制出从EV-10到EV-40的一系列电动汽车。随后,在1991年开发出TownAce EV,1992年研制出Crown Majesta EV,1993年开发了EV-50,1994年开发了Coaster混合动力电动汽车。1995年,丰田汽车公司成功开发了实用的混合动力电动汽车Prius,并在1997年投入市场销售,是世界上混合动力电动汽车商业化最成功的一款车型。最新一代的Prius搭载了THS II混合动力驱动系统,交流永磁同步电动机电压达到了500V,输出功率增大到50kW,发动机最高转速提高到10 000r/min,整车性能水平

已超过采用2.0L发动机的普通轿车。继Prius后,丰田汽车公司于2001年6月上市了混合动力系统驱动的7、8座多用途车——Estima混合动力四轮驱动汽车,采用前后轮驱动,无级变速器CVT作为传动系统。2001年8月,丰田汽车公司发布了配置丰田轻度混合动力系统的皇冠Loyal Saloon。除此之外,丰田汽车公司一直积极进行燃料电池电动汽车的开发工作,如1996年发布的由Sports Utility公司RAV4号电动汽车改装的燃料电池混合动力电动汽车,其最高时速为100km/h,续驶里程达到250km。丰田公司开发了FCHV系列燃料电池电动汽车,其最高车速超过150km/h,续驶里程已基本接近燃油汽车。丰田公司在2001年4月还公布了与日野公司合作开发的FCHV-BUS1汽车,全长10.5米,该车搭载了90kW燃料电池,2台80kW交流同步电动机,最高车速超过80km/h,续驶里程达到了300km。

尼桑汽车公司1970年开始电动汽车的基础研究工作。它的第一辆概念电动汽车City在1970年的东京汽车展览会上展出。1976年尼桑推出EV-4,1983年推出March EV,1985年推出EV Resort,1987年推出March EV-II,1988年推出电动清洁车。1991年它生产了President EV、Cedric EV和FEV。1995年它又推出了第二代产品FEV II,采用锂离子电池作动力电池。1994年尼桑汽车公司开始在日本国内销售4座Cedric EV电动汽车。1997年,尼桑推出了4座ALTRA电动汽车。该车采用质量仅为39kg的62kW永磁同步电动机和高效率的控制器,使动力系统的总效率高达89%以上。动力电池采用钴基锂离子电池,能量密度90W·h/kg,功率密度为300W/kg。ALTRA的最高车速为120km/h,市区循环工况续驶里程为192公里。2000年,尼桑汽车公司上市了搭载了1.8L、74kW汽油发动机和17kW电动机的混合动力电动汽车Tino,在10.15工况下,燃油经济性为23km/L。同时它还参与了加州燃料电池的合作开发计划,并且推出了直接氢燃料电池电动汽车FCV。

20世纪90年代初期,法国雪铁龙汽车公司开始发展电动汽车。1990年,它开发了Peugeot J5和Citroen C25公用型电动汽车并投入市场。1995年,Peugeot 106和Citroen AX电动小轿车投放市场,接着又推出了Citroen Citela和Peugeot Ion。1998年,雪铁龙汽车公司将燃油汽车Xsara改造为由发动机、电动机构成的并联式混合动力电动汽车Xsara Dynalto,在2000年发布了性能提高了的Xsara Dynactive。Xsara Dynalto用起动发电机来代替汽油发动机的飞轮,从开关开启到起动只需0.1s。起动发电机的使用能够弥补发动机在低速运转或急加速情况下的不足,使驾驶更容易,并减少油耗、排放和噪声。货车型的Xsara Dynactive,在55kW的发动机和自动变速箱之间配置了25kW的永磁同步电动机,该车的最高车速为170km/h,0~100km/h的加速时间为12.6s,正常续驶里程1000km,燃油经济性为19.2km/L。近年来,雪铁龙汽车公司与雷诺汽车公司合作开发燃料电池电动汽车。

大众公司在1990年发布了由高尔夫车改造而成的前轮驱动并联式混合动力电动汽车,它采用44kW柴油发动机及9kW三相交流电动机。整车质量1200kg,只有发动机驱动时,最高车速可以达到150km/h,一次充电的续驶里程可以达到20~25km。

雷诺公司也研究、试制了各种各样不同的混合动力电动汽车,如1998年公开的Scenic Hymne就是在量产车Scenic的80kW汽油发动机的基础上增加了30kW的永磁同步电动机和140kg的镍镉电池,从而构成了混合动力系统。市内低

速行驶时只靠电动机驱动可以行驶 25~30km。

1989 年, 宝马公司推出它的第一代宝马改装电动汽车 E30E, 1991 年研制出第二代电动汽车 E36E。1991 年, 宝马公司开发出它的第一代专门设计制造的 2 门 4 座电动概念车 E1。1992 年宝马发布了它的 4 门 4 座的新车型 E2。最近, 宝马公司加入了由通用汽车、戴姆勒—克莱斯勒集团在混合动力技术发展方面的技术联盟, 共同发展混合动力电动汽车技术。

5.1.2.2 国内电动汽车发展现状

自“八五”以来, 我国就已经在电动汽车系统设计与开发、零部件研制、能量存储装置、示范运行和标准制定及政策研究等多方面取得了诸多成果。

“十五”期间, 我国启动实施了国家“863 计划”电动汽车重大专项支持电动汽车的研究。专项提出“三纵三横”研究开发布局, 即以纯电动汽车、混合动力电动汽车、燃料电池电动汽车三种整车研究为核心, 贯穿 3 个车型的多能源动力总成、电动机驱动系统和电池及其管理系统作为电动汽车研究的共性技术开展研究工作。

通过近五年的努力, 三类电动汽车分别完成了功能样车、性能样车和产品样车试制。混合动力和纯电动汽车通过了国家标准规定的考核试验, 已有 7 种车型进入国家汽车产品公告程序, 其中 4 种车型已获批准, 具备小批量生产能力; 燃料电池电动汽车通过了第三方检测, 达到了专项预定的目标。开发纯电动客车产品 4 个, 研制车辆共 40 台; 纯电动轿车产品 2 个, 研制原型车和示范车 25 台; 混合动力客车产品 2 个, 研制原型车和示范车 32 台, 产品车 15 台; 混合动力轿车产品 4 个, 研制原型车和示范车 25 台; 燃料电池客车车型 2 个, 研制原型车和示范车 5 台; 燃料电池轿车车型 3 个, 研制原型车和示范车 13 台。

在整车性能方面, 由北京理工大学联合相关企业研发生产的 4 种车型 35 辆公交车已示范运行, 等速百公里耗电 70kW·h。天津清源电动车辆股份有限公司与天津汽车工业(集团)有限公司等单位联合研发的纯电动轿车, 最高时速超过 120km, 一次充电续驶里程达 252km。

在混合动力电动汽车方面, 中国第一汽车集团公司联合哈尔滨工业大学、吉林大学、春兰集团共同开发的混合动力城市客车单车累计运行超过 2 万 km, 最高车速达到 80km/h, 百公里平均油耗低于 30L, 具有明显的节油效果。在该车上采用的电动机主动同步换挡技术, 使得 AMT 的换挡平顺性得到了改善。东风汽车公司联合相关单位研发的混合动力轿车, 最高车速达到 164km/h, 0~100km/h 加速时间 15.6s, 最大爬坡度 30%, 城市工况下的百公里油耗 7.2L。

我国自主研发的燃料电池汽车已经过了 3 万 km 以上的试验运行考核, 主要技术指标达到国际先进水平, 燃料电池电动轿车和客车两种车型的节油效果均十分显著。上海燃料电池动力系统有限公司联合同济大学、上海汽车工业(集团)总公司等单位研发的燃料电池轿车最高车速达 123km/h, 百公里加速 19s, 续驶里程 230km, 百公里氢燃料消耗 1.12kg, 约合 4.3L 汽油(同类传统汽车油耗为 7~8L)。清华大学联合北京客车总厂等单位研制出 3 辆 BK6110FCHEV 型燃料电池城市客车示范车和 2 辆 BF6120FCHEV 型燃料电池城市客车目标车。目标最高车速 85km/h, 百公里氢燃料消耗 4.26kg(40km/h 等速)。

5.1.3 电动汽车的分类

电动汽车可分为纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车。通常, 纯电动汽车是指以蓄电池为能源、电

动机作驱动的车辆, 如镍氢电池电动汽车、锂离子电动汽车等。一般认为混合动力电动汽车是指既有内燃机(或发动机)又有电动机驱动的车辆, 以汽油或柴油及蓄电池为能源。根据结构的不同, 混合动力电动汽车可分为串联混合式、并联混合式、混联混合式及复合混合式四种。燃料电池电动汽车是以燃料电池为能源, 电动机作驱动的电动汽车, 通常辅以蓄电池作缓冲能源。

5.1.4 电动汽车的主要特点

与内燃机汽车相比, 电动汽车有许多特点。表 1.1-4 中给出了电动汽车与内燃机汽车性能和用途方面的比较。电动汽车的价格比内燃机汽车高, 决定了电动汽车的初期投入大、费用支出多, 但是电动汽车的维修保养费用低, 随着使用年限的延长, 其使用费用支出会逐渐降低, 甚至会低于内燃机汽车使用成本。

表 1.1-4 电动汽车与内燃机汽车性能和用途比较

项 目	性 能							用 途						
	机动性	废气排放	噪声震动	操作难易	能源补给	购置费用	维修费用	大范围作业	连续作业	不通风场所	低噪声场所	狭窄场所	易燃易爆场所	低温场所
电动汽车	○	○	○	○	★	☆	○	☆	★	○	○	○	○	○
汽油汽车	○	☆	★	★	○	○	☆	○	○	★	★	☆	☆	☆
柴油汽车	○	★	☆	★	○	★	★	○	○	★	☆	☆	☆	☆

注 ○—好(适用); ★—一般; ☆—差(不适用)。

(1) 无污染, 低噪声。电动汽车无内燃机汽车工作时产生的废气, 不产生排气污染, 对环保十分有益, 是“零污染”车辆。而内燃机汽车废气中的 CO、碳氢化合物及 NO_x、微粒、臭气等污染物会形成酸雨、酸雾及光化学烟雾。噪声对人的听觉、神经、心血管、消化、内分泌、免疫系统有害。电动汽车无内燃机产生的噪声, 电动机的噪声也较内燃机小。电动汽车并非绝对无污染, 例如使用铅酸蓄电池做动力源, 制造、使用中要接触到铅, 充电时产生酸气, 会造成一定的污染。蓄电池充电所用的电力, 在用煤炭作燃料时会产生 CO、SO₂、粉尘等。但它的污染较内燃机的废气要轻得多, 而且随着技术的发展, 可以用其他形式的电力做电动汽车的电源, 如发展水电、核电、太阳能充电。

(2) 能源效率高, 多样化。研究表明, 电动汽车的能源效率已超过汽油机汽车, 特别是在城市运行, 汽车走走停停, 行驶速度不高, 电动汽车更加适宜。电动汽车停止时不消耗电量, 在制动过程中, 电动机可自动转化为发电机, 实现制动减速时能量的再利用。另外, 电动汽车的应用可有效地减少对石油资源的依赖, 可将有限的石油用于更重要的方面。向蓄电池充电的电力可以由煤炭、天然气、水力、核能、太阳能、风力、潮汐等能源转化。除此之外, 如果夜间向蓄电池充电, 还可以避开用电高峰, 有利于电网均衡负荷, 减少费用。

(3) 结构简单, 使用维修方便。电动汽车较内燃机汽车结构简单, 运转、传动部件少, 维修保养工作量小, 当采用感应电动机时, 电机无需保养维护, 更重要的是电动汽车易操纵。

(4) 动力电源使用成本高, 续驶里程短。电动汽车尚不如内燃机汽车技术完善, 尤其是动力电池的寿命短, 使用成本高。电池的储能量小, 一次充电后行驶里程不理想, 电动汽车的价格较贵。但从发展的角度看, 电动汽车的问题会逐渐得到解决, 其价格和使用成本必然会降低。

5.2 节能环保汽车及其技术

5.2.1 发展现状

汽车节能与环保技术主要有两条路线:①针对传统车辆围绕节能和清洁燃料替代的技术;②新型节能与环保车辆技术,主要是电动汽车以及液压混合动力车辆等。国内外汽车节能与环保技术的发展现状可概括如下:

(1) 汽车轻量化进展迅速,全铝或轻质合金车身技术成熟并已小批量试产。

(2) 小型纯电动汽车和混合动力汽车商业化成绩斐然,纯电动大客车和燃料电池汽车已进行商业示范。

(3) 液压混合动力汽车实现商业化。

(4) 锂电池、超级电容和电容电池的技术进步为节能和环保技术提供了更大的发展空间。

(5) 净燃料多样化和多元化,为汽车节能与环保技术注入了新的活力。

5.2.2 汽车的节能与环保技术

汽车的节能和环保技术主要体现在以下几个方面:

(1) 核心发动机的技术提升。通过包括发动机匹配标定技术、燃烧分析及排放控制技术、发动机电喷系统设计及匹配技术、发动机降低噪声技术、增压中冷技术、无凸轮配气相位系统设计与匹配技术、可变气门升程和正时技术、柴油机喷油共轨技术、发动机催化转化系统设计与匹配技术、柴油微粒捕集器及再生系统设计和匹配技术、稀混合气下 NO_x 转化技术、废气再循环技术和可变增压器技术等新技术的采用,燃油经济性已经达到相当高的水平。研究和实践还表明,柴油车的燃油经济性要比汽油车高45%~50%。柴油机也被认为是具有低油耗、低排放、高可靠性特征的成熟产品。

(2) 车用动力系统配置和控制的优化。主要是动力系统中发动机、变速箱和整车的匹配优化,以及新型驱动系统或传动系统的创新与设计,如电控无级变速器(eCVT)、电气变速器(EVT),以达到针对使用工况燃油经济性提高的目的。在整车控制上,通过优化控制达到提高燃油经济性的目的。

(3) 整车轻量化。这主要是通过结构和材料的改进达到减轻质量和省油的目的。通过轻量化材料如高强度钢、镀层钢板、铝镁钛合金、高延性铝合金板、高强度铝合金型材、抗蠕变镁合金、热塑性弹性体、高密度聚乙烯、高性能磁性

材料、汽车传感器用功能材料和汽车安全气囊织物等的采用可以达到整车轻量化和节油的目的。

(4) 燃油品质的改善。通过提高燃油的燃烧特性可以达到省油的目的,在润滑油中加入添加剂也可以达到减少磨损、延长动力系统机械寿命进而节能的目的。尤其是纳米技术的应用,通过润滑油添加剂或将其直接应用到润滑油合成过程中可大大提高润滑油的性能,对减小汽车机件尤其是发动机机械摩擦损失和发动机尾气排放量效果明显,是现有整车用户除驾驶方法改善外进行汽车节油的另一个重要和有效的手段。

(5) 采用环保材料。如汽车用水性涂料、汽车用粉末涂料、环保型密封胶黏接剂、塑料、复合材料的回收与再生技术,纳米稀土尾气净化材料的开发与应用,抗磨减磨功能材料的开发与应用,压缩天然气气瓶材料等。也可利用纳米材料,改善聚合物的强度、刚度和韧性,提高聚合物的透光性、阻隔性和耐热性及防紫外线性,从而开发出高性能塑料并用于内、外装件和结构件,达到环保和节油的目的。

(6) 发动机余热利用。利用热电动机发电机组将发动机损失的热量利用温差发电技术转变成电能得以利用(如驱动空调),或通过发动机尾气余热利用系统将发动机余热加以利用。发动机余热发电技术比较适合北方发动机余热与环境温度差较大的地区。该技术已经趋于成熟,可在不增加额外能耗的前提下,将发动机余热的近60%加以利用。

(7) 采用新型燃料。在传统汽车的节能和环保技术进步过程中也诞生了以压缩天然气、氢燃料、合成燃料、液化石油气、醇醚燃料作为单一燃料或切换使用传统石油燃料的节能环保型汽车。以煤或廉价天然气资源来合成油的技术是最直接的石油替代技术方案,也已经备受关注。这些技术通过充分利用各种石油产品或非化石燃料达到节省石油资源、减慢石油资源消耗速度的目的。

(8) 新型节能环保车辆的研发。纯电动汽车由于价格太高,续航里程未能满足使用者的需求,其应用前景不被看好,但是,小型、低速、特种用途的纯电动汽车也在不断发展。混合动力汽车技术是新能源车辆的主流技术,混合动力轿车也获得了大范围的商业成功,国内外几乎所有的汽车公司都在积极研发各自的混合动力汽车产品。燃料电池电动汽车是汽车节能与环保技术的最终发展方向,应予以重点关注。



第2章 汽车电源与起动机

汽车电源包括蓄电池和发电机，其作用是向汽车各用电设备提供电能。蓄电池与发电机并联。在发动机正常工作时，用电设备所需的电能主要由发电机供给，而蓄电池的作用是：

- (1) 用来储存电能，以便于迅速及时地将存储的电能提供给发动机起动。
- (2) 允许车灯在任意时刻使用。
- (3) 在发电机不发电或电压较低的情况下，保证汽车电气设备工作。
- (4) 可以保持长时间不使用的汽车动力记忆功能及报警系统有效。

这些作用中前两项是最重要的。当汽车的应用条件给定时，用于确定是否为最适用蓄电池的标准大部分就是依据这两项内容。

此外，蓄电池还相当于一个容量很大的电容器，在发电机转速和用电负载发生较大变化时，可保持汽车电网电压的相对稳定。同时，还可吸收电网中随时出现的瞬间过电压，以保护用电设备尤其是电子元器件不被损坏，这一点对装有大量电子系统的现代新型汽车是非常重要的。发动机绝不允许脱开蓄电池运转。

1 蓄电池

1.1 蓄电池和汽车其他电器的连接

蓄电池是可逆低压直流化学电源。它可将电能转变为化学能存储起来，有需要时，又可将化学能转换为电能向外供电。

蓄电池与发电机、负载并联。如图 1.2-1 所示，蓄电池的一个极柱接铁，另一个极柱接起动机开关接线柱，再接至电流表。通过电流表后，接用电设备。发电机的一个电极在机壳内部接铁(内搭铁)，另一个电极接到电流表的负载接线柱一侧。发电机的磁场接线柱接调节器的“磁场”或“F”接线柱。调节器的另一接线柱接点火开关，以便在起动时，蓄电池向调节器线圈和发电机励磁绕组供电。调节器调节后的电压，经电流表与蓄电池并联，以显示充电状态。

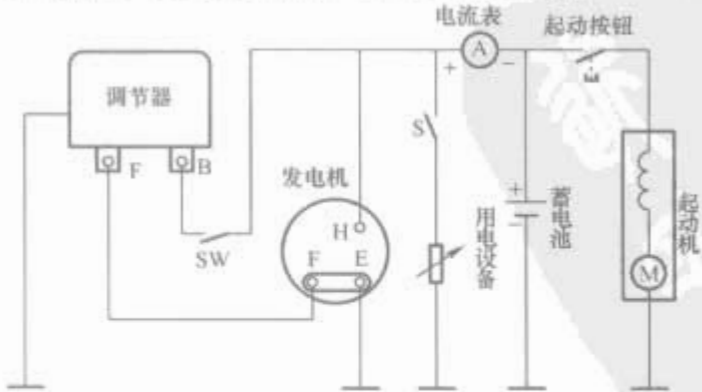


图 1.2-1 汽车电源与负载的连接

1.2 蓄电池的选用与安装

1.2.1 蓄电池的选用

- 蓄电池的选用取决于两种情形：
- (1) 在非常寒冷的环境下，能否为发动机提供低速启动

的电能。

- (2) 当发动机不工作时，蓄电池能否按要求给汽车电气设备供电。

第(1)条是决定性的因素。图 1.2-2 所示为在不同温度条件下起动机所需功率和蓄电池可使用功率的对比图。两条曲线的交点是系统冷起动的最低极限。欧洲大都使用 -18°C 作为冷起动的极限值，蓄电池要满足这一要求才可以被选择使用。

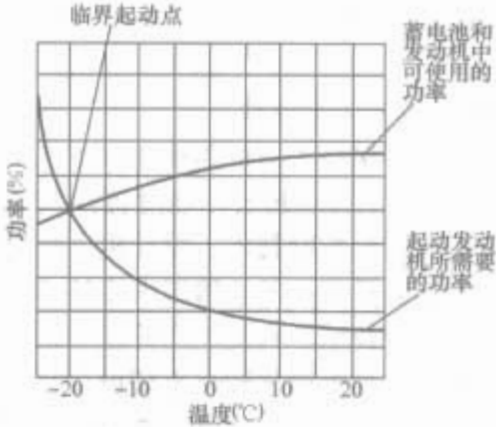


图 1.2-2 不同温度下发动机所需的功率和蓄电池可使用功率的对比图

1.2.2 蓄电池的安装

选择汽车蓄电池的安装位置需要考虑以下几个因素：

- (1) 汽车部件的重量分布。
- (2) 接近起动机以缩短传输电缆长度。
- (3) 拆卸安装方便。
- (4) 抗污染性。
- (5) 周围环境的温度。
- (6) 抗振动性。

通常，上述各项因素会因汽车的类型、用途及工作环境温度等而各不相同。极端的温度条件可能需要给蓄电池加装加热器或冷却风扇，蓄电池工作过程中产生的可燃气体也是一个需要考虑的因素。

蓄电池在汽车上的安装位置，根据车型和结构而定。一般地，轿车装在发动机罩内，货车装在车架前部的左侧或右侧，以空载时重量平衡为原则。客车多装在车厢内。蓄电池都是用特殊的金属框架和防震垫固定的。

蓄电池种类很多，根据电解液的不同，可分为酸性蓄电池和碱性蓄电池。碱性蓄电池的电解液是化学纯净的苛性钠或苛性钾溶液。酸性蓄电池的电解液为纯净的硫酸溶液。在汽车上使用最广泛的是起动型铅酸蓄电池，其电极的主要成分是铅，电解液是稀硫酸溶液。下面主要介绍铅酸蓄电池，简称铅蓄电池。

1.3 铅酸蓄电池的构造与型号

1.3.1 铅酸蓄电池的构造

普通型铅蓄电池是在盛有稀硫酸的容器中插入两组极板而构成的电能储存器，每个单格电压为 2V ，再将若干单格电池串联组成蓄电池总成，以满足汽车用电设备额定电压的要求。图 1.2-3 所示为一个 6V 普通型蓄电池的解剖图，它主要由极板、隔板、壳体、电解液、铅连接条、极柱等部分组成。

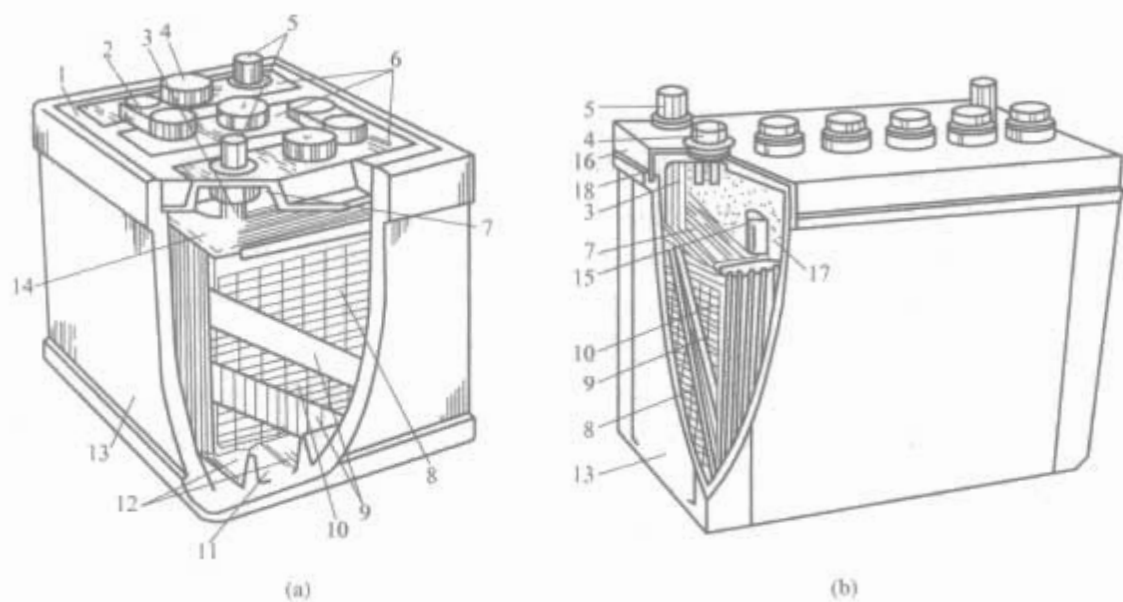


图 1.2-3 6V 普通型蓄电池的结构
(a)单格盖式；(b)整体盖式

1—封口料；2—联条；3—极柱；4—带通气孔的注液口盖；5—极柱接线端；6—单格电池盖；7—防护板；8—负极板；9—隔板；10—正极板；11—沉淀槽；12—垫角；13—外壳；14—横板；15—内穿壁式联条；16—整体盖；17—单格壁；18—熔合缝

1.3.1.1 极板

极板是蓄电池的最基本部件，分正极板和负极板两种，均由栅架和填充在其上的活性物质构成。正极板上的活性物质是二氧化铅(PbO₂)，呈深棕色。负极板上的活性物质是海绵状纯铅(Pb)，呈青灰色。

栅架的作用是容纳活性物质并使极板成形，一般由铅锑合金浇铸而成。铅锑合金中含锑 6%~8.5%，加入锑是为了提高栅架的机械强度并改善浇铸性能。但铅锑合金耐电化学腐蚀性能比纯铅差，锑易从正极板栅架中解析出来引起蓄电池的自放电和栅架的膨胀、溃烂。因此，栅架的生产材料将向低锑(含锑量小于 3%)、甚至不含锑的铅钙合金发展。栅架的制造成形除浇铸外，还采用滚压扩展成型的方式。

铅粉是极板活性物质的主要原料。它是用铅块放入球磨机中研磨成粉，在研磨中铅粉与空气接触，氧化成氧化铅。然后加入一定的添加剂和硫酸溶液调和成膏状，涂在栅架上，干燥后放入硫酸溶液中，经较长时间的充电(蓄电池生产中称为“化成”，一般在 18~20h)，使正极板变成棕色的二氧化铅，负极板变成青灰色的海绵状铅。为了防止负极板上活性物质的收缩，增加其多孔性，铅膏里常加入添加剂，如硫酸钡、腐殖酸、木素磺酸钠、炭黑等。同时，还在活性物质中加入天然纤维和合成纤维，以防止活性物质的脱落和产生裂纹。

目前，国内外都已采用厚度为 1.1~1.5mm 的薄型极板(正极板比负极板稍厚)。薄型极板对提高蓄电池的比容量和改善起动性能都是很有利的。另外在单格电池中，正极板总比负极板少一片。例如，东风 EQ1090 汽车所使用 6-Q-105 型蓄电池总片数为 15 片，正极板 7 片，负极板 8 片。其目的是为了使正极板都处于负极板之间，使其两侧放电均匀，减轻正极板的翘曲和活性物质的脱落(正极板活性物质较疏松，机械强度低)。

为增大蓄电池容量，通常将多片正极板和多片负极板分别并联，用横板焊接组成正极板组和负极板组。安装时将正、负极板组相互嵌合，中间插入隔板就成了一个完整的单格电池。

1.3.1.2 隔板

为降低内阻、缩小蓄电池的尺寸，正、负极板在保证互不接触的情况下，应尽可能靠近，办法是采用隔板把正极板

和负极板分开。由于电化学反应在液体中进行，有离子迁移运动，隔板应具有良好的多孔性、耐腐蚀性。常用的隔板有木质、微孔橡胶和微孔塑料隔板等。木质隔板耐腐蚀性能差，已被淘汰。现在多采用微孔橡胶、微孔塑料隔板，其耐酸性好，强度高，寿命长。

隔板也是长方形状，略大于极板，一边有沟槽。装配时，有沟槽的一面对着正极板。正极板化学反应激烈，沟槽能使电解液上下流动方便。

有的厂家还将微孔塑料隔板制成袋状紧包在正极板外部，以防止活性物质脱落，避免极板内部短路并使组装机工艺简化。

1.3.1.3 电解液

电解液在电能和化学能的转换过程即充电和放电过程中参与蓄电池的电化学反应。它由高纯度硫酸(相对密度为 1.84g/cm³)和蒸馏水按一定比例配制而成，相对密度一般为 1.24~1.31g/cm³。

电解液的配制必须符合相应的国家标准和专业标准的规定。工业用硫酸和一般的水中因含有铁、铜等有害杂质会增加自放电和损坏极板，故不能用于蓄电池。

我国幅员辽阔，气候条件复杂，为此，国家规定了各地区的电解液相对密度值，见表 1.2-1，供选用时参考。

表 1.2-1 不同地区和气温条件下的电解液相对密度

气候条件	全充电 15℃时的相对密度(g/cm ³)	
	冬季	夏季
冬季温度低于-40℃地区	1.310	1.250
冬季温度高于-40℃地区	1.290	1.250
冬季温度高于-30℃地区	1.280	1.250
冬季温度高于-20℃地区	1.270	1.240
冬季温度高于 0℃地区	1.240	1.240

注 电解液相对密度值随温度变化而变化，一般温度每升高 1℃，相对密度变化值为 0.000 75g/cm³，我国规定的电解液温度为 25℃。

1.3.1.4 壳体

为使用方便和增加强度及刚度，汽车蓄电池的壳体多制成整体。内用间壁分隔成几个单格，每个单格放入极板组后，构成一个单格电池。壳体应耐酸、耐震、耐热、耐寒，绝缘性好，有一定的机械强度且不得渗漏，壳壁薄而轻(约为 2mm)。壳体多用塑料制造，也有用硬橡胶制成的。各单格上部加盖，传统蓄电池盖上一般有三个孔，两边孔供极柱穿出，中间孔用来加水 and 检查，称为加液孔。加液孔上盖有塑料制成的螺塞，其上有通气小孔，便于蓄电池内的气体排出。为防止震动时电解液溅出，极柱穿出电池盖处加铅封衬套，装配时与电柱焊在一起。盖与壳体顶部用沥青密封。穿出盖外的单格电池正、负极板组极柱头用联条焊接，使各单格电池串联。每个电池只留正、负两个极柱，一般在正极柱上涂有红色，并铸有“+”号；负极柱上不涂色，只铸有“-”号。正、负极柱也可根据其本身的颜色加以区分，正极柱呈棕褐色，负极柱呈青灰色。

壳体底部有凸筋，起支撑极板组的作用。凸筋之间的槽，用以容纳极板的脱落物质，防止正负极板短路。

1.3.1.5 其他部件

- (1) 防护板。通常是一片充满小孔的 1mm 厚橡胶板或塑料板。它盖在极板组的上面, 保护极板不被碰伤, 还能防止落入异物使极板短路(见图 1.2-3 中的 7)。
- (2) 联条。采用每单格一个盖的蓄电池, 每单格均有一个极柱, 相邻单格同一侧的总是异名极柱(一个为正极柱, 另一个为负极柱)。蓄电池组内各单格为串联连接, 因此需将这些异名极柱连接起来。这些与极柱熔焊在一起的连接板条叫做联条, 通常是用铅锑合金铸成的一根两端带孔的长条(见图 1.2-3 中的 2)。

(3) 封口料。填充在蓄电池盖与外壳之间缝隙里的易熔材料就是封口料(见图 1.2-3 中的 1), 其作用是密封间隙, 防止电解液溢出。封口料必须耐酸、耐温、耐寒、具有黏性, 软化点应高于 100℃, 在零下 60℃时也不开裂。工程塑料外壳与整体式盖之间, 可以直接加热熔合, 不必使用封口料。

1.3.2 蓄电池型号

蓄电池的型号按我国机械行业标准 JB/T 2599—1993《铅酸蓄电池 产品型号编制方法》, 蓄电池产品型号采用汉语拼音大写字母及阿拉伯数字表示, 由三段组成, 各段的含义如下:



- (1) 串联单体蓄电池数。指在一只整体蓄电池槽内或一个组装箱内所包含的串联蓄电池数目, 用阿拉伯数字表示。当单体蓄电池数目为“1”时, 此段应略去。
- (2) 蓄电池类型是根据其主要用途来划分的, 按表 1.2-2 中代号标志。

表 1.2-2 蓄电池类型代号

序号	蓄电池类型 (主要用途)	代 号	汉字及拼音	
			汉 字	拼 音
1	起动型	Q	起	qi
2	固定型	G	固	gu
3	(电力)牵引型	D	电	dian
4	内燃机车用	N	内	nei
5	铁路客车用	T	铁	tie
6	摩托车用	M	摩	mo
7	航标用	B	标	biao
8	船舶用	C	船	chuan
9	阀控型	F	阀	fa
10	储能型	U	储	chu

(3) 蓄电池特征为附加部分。同类型的蓄电池具有某种特征而在型号中必须加以区别时, 应按表 1.2-3 中的代号标志。当蓄电池同时具有几种特征时, 应按表 1.2-3 中的顺序将代号并列标志, 如以某一主要特征已能表达清楚时, 应以该特征的代号来标志。

表 1.2-3 蓄电池特征代号

序号	蓄电池特征	代 号	汉字及拼音	
			汉 字	拼 音
1	密封式	M	密	mi
2	免维护	W	维	wei
3	干式荷电	A	干	gan
4	湿式荷电	H	湿	shi
5	防酸式	F	防	fang
6	带液式	Y	液	ye

- (4) 额定容量以阿拉伯数字表示, 其单位为 A·h, 在型号中, 单位略去。
- (5) 当需标志蓄电池所能适应的特殊使用环境时, 应按照国家有关标准及规程的要求, 在产品型号末尾以及有关技术文件上作明显标志。
- (6) 蓄电池型号末尾允许标志临时代号。
- (7) 对出口的蓄电池或来样加工的蓄电池型号, 允许按有关协议或合同进行编制。

例如: 6-QAW-100 指由 6 个单体电池组成, 额定电压 12V, 额定容量为 100A·h 的起动型干荷电免维护蓄电池; 6-QA-105G 表示由 6 个单体电池组成, 额定电压 12V, 额定容量为 105A·h 的起动型干荷电高起动率蓄电池。

1.4 蓄电池工作原理

蓄电池由浸渍在电解液中的正极板和负极板组成, 电解液是硫酸(H₂SO₄)的水溶液。在充足电状态下, 正极为二氧化铅(PbO₂), 负极为海绵状纯铅(Pb)。完全放电后, 两个极板上都变为硫酸铅(PbSO₄)。

在充、放电过程中, 蓄电池中发生的化学反应是可逆的。当接通负载(用电设备)时, 蓄电池作为电源向外供电, 将内部的化学能转变为电能。当电量不足而将蓄电池接入其他具有适当电压的直流电源时, 又能对蓄电池充电, 将外界供给的电能转变为蓄电池内部的化学能。

1.4.1 电解液中的电离过程和电离平衡

蓄电池用电解液就是电解质硫酸的水溶液, 为第二类导体, 即靠离子导电。H₂O 是极性分子, 显示一定的电性, 可与其他极性分子相互作用。H₂SO₄ 是一种具有极性键的分子, 和水分子的作用最为显著。硫酸在水分子的作用下, 会被离解为 HSO₄⁻ 和 H⁺。而 HSO₄⁻ 还可能再被水分子离解为 H⁺ 和 SO₄²⁻。

硫酸在水中被离解为 HSO₄⁻ 和 H⁺ 的过程, 就叫做电离过程。然而这种电离过程是可逆的, 一部分负、正离子又可重新结合成分子。



当电离过程的速度等于离子结合为分子的速度时, 电解液中正、负离子浓度和分子浓度就不再改变, 即达到平衡状态。

1.4.2 电势的建立

一旦极板浸入电解液, 其表面就与电解液起电化学反应。负极板上的 Pb 被离解为 Pb²⁺ + 2e⁻, 电子留在负极板上, Pb²⁺ 溶于电解液中, 从而使极板与电解液之间, 建立起电极电位。负极板相对于电解液是负电位, 约为 -0.1V。反应式为



正极板上的 PbO₂ 被溶解, 与硫酸作用生成过硫酸铅 Pb(SO₄)₂, 再离解为四价的铅离子 Pb⁴⁺ 和硫酸根离子 SO₄²⁻, 即



Pb⁴⁺ 附着在正极板上, 使其带正电位, 相对于电解液为 2.0V。两极之间的电位差为

$$E_0 = 2.0 - (-0.1) = 2.1V \tag{1.2-6}$$

这就是蓄电池的静止电动势。

1.4.3 放电过程

若将蓄电池外电路接入负载, 在电动势 E₀ 的作用下,

电子从负极板经导线流向正极板,使正极产生电压降;流到正极板上的电子,与 Pb^{4+} 结合,变成 Pb^{2+} 。 Pb^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合,生成 PbSO_4 , 沉附于正极板上。

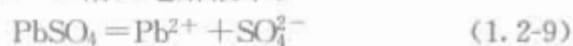


同时,负极板上的 Pb^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合,生成硫酸铅,沉附在负极板上。

在整个放电过程中,正极板上的二氧化铅和负极板上的海绵状纯铅不断转变为硫酸铅和水。从理论上说,这种电化学反应能一直进行到极板上的所有活性物质完全转变为硫酸铅为止,但是,由于电解液难于渗入到极板内部的活性物质,就是完全放电的蓄电池也只不过利用了 20%~30% 的活性物质。

1.4.4 充电过程

将蓄电池接入端电压应高于蓄电池电动势的直流电源,蓄电池将被充电。充电电流由蓄电池的正极流入,负极流出。电子由正极板流向负极板。由于正极板处有硫酸铅电离后形成的 Pb^{2+} 和 SO_4^{2-} , 在充电电流的作用下, Pb^{2+} 又失去两个电子成为 Pb^{4+} , 溶入电解液中。



Pb^{4+} 与两个 SO_4^{2-} 结合,生成过硫酸铅 $\text{Pb}(\text{SO}_4)_2$ 。过硫酸铅再与水作用,生成二氧化铅,沉积在正极板上。



同时,负极板上也有少量 PbSO_4 离解于电解液中,其中, Pb^{2+} 由于充电的作用获得两个电子,变为海绵状纯铅。



在蓄电池充电的整个过程小,活性物质的化合与分解不断进行,其最终化学反应式为



式(1.2-14)从左到右为放电过程,从右到左为充电过程。

由此可见,充电时的电化学反应消耗了水和硫酸铅,使正极板还原为二氧化铅,负极板还原为纯铅,电解液的硫酸浓度增加。

1.4.5 极化理论

极化是蓄电池在充放电过程中一种现象,指极板电极电位的变化。变化前后的电位差称为过电位,其正负与大小随充放电程度和极板的不同而变化。

1.4.5.1 电化学极化

这种极化现象是由电化学反应的迟缓性引起的,多发生在充电终了。这时,产生大量 H^+ , 它迅速移向负极,但 H^+ 吸收电子结合为氢分子的过程较慢。大量 H^+ 聚集在极板周围,产生 0.33V 的过电位,即电化学极化。

1.4.5.2 浓差极化

浓差极化是由电解液中离子迁移的速度较慢而引起的,即由浓度差引起,起动时最为严重。充放电过程中,电化学反应在极板表面进行,同时溶液中伴有离子传递。 HSO_4^- 传递运动最慢,产生了浓度梯度,即浓差极化,从而使充放电过程延长。电流越大,极化越严重。

1.4.5.3 欧姆极化

欧姆极化即是蓄电池内阻所产生的电压降落,当然,也是电流越大极化越严重。

充电时,极化现象使蓄电池端电压上升;放电时,极化现象使端电压下降,对蓄电池的使用极其不利,且极化随电

流增大而增大。

1.4.5.4 快速充电

为了消除极化,在对蓄电池充电时,有的使用快速充电机。它是一种程控模式充电方法,配合适当的正负脉冲和间歇,消除了极化,从而可大大地提高充电电流强度,缩短充电时间。

1.5 蓄电池工作特性

1.5.1 电动势

电动势是指蓄电池在静置状态(不充电也不放电)下,正负极板之间的电位差(开路电压),用 E_0 表示。它的大小与电解液的相对密度和温度有关,在相对密度为 1.050~1.300g/cm³ 的范围内,可由下述经验公式计算其近似值:

$$E_0 = 0.85 + \rho_{25^\circ\text{C}} \quad (1.2-15)$$

式中: $\rho_{25^\circ\text{C}}$ 为 25℃ 的电解液相对密度。

实测所得电解液相对密度应按下式换算成 25℃ 时的相对密度

$$\rho_{25^\circ\text{C}} = \rho_t + \beta(t - 25) \quad (1.2-16)$$

式中: ρ_t 为实际测得的电解液密度; t 为实际测得的电解液温度; β 为密度温度系数, $\beta = 0.00075$, 即温度每上升 1℃, 相对密度将变化 0.00075g/cm³。

汽车用蓄电池的电解液相对密度在充电时增高,放电时下降。一般在 1.12~1.30g/cm³ 波动,因此,蓄电池的电动势也相应地在 1.97~2.15V 变化。

1.5.2 内阻

蓄电池的内阻大小反映了蓄电池的带负载能力。在相同的条件下,内阻越小,输出电流越大,带负载能力越强。蓄电池的内阻为极板电阻、电解液电阻、隔板电阻、铅连接条和极柱电阻的总和,用 R_0 表示。

极板电阻一般很小,并且随极板上的活性物质的变化而变化。充电后电阻变小,放电后电阻变大,特别是在放电终了,由于有效活性物质转变为硫酸铅,则电阻大大增加。

隔板电阻因所用的材料而异。木质隔板比微孔橡胶隔板、微孔塑料隔板的电阻大。另外,隔板越薄,电阻越小。

电解液的电阻则随其密度、温度不同而变化。如 6-Q-75 型蓄电池在温度为 40℃ 时,其内阻约为 0.01Ω,但在 -20℃ 时则为 0.019Ω。可见,内阻随温度的降低而增大。

电解液的电阻与密度有关。电解液在 15℃、密度为 1.200g/cm³ 时电阻最小。因为在该密度下的电解液中, H_2SO_4 离解为 H^+ 和 SO_4^{2-} 的数量最多,电解液的导电能力增强。当电解液的密度过低时, H_2SO_4 的含量少,导电的离子少,导电性能差,电阻也增大。当电解液的密度过高时, H_2SO_4 的离解作用变慢,电解液的黏度也增大,所以电阻值比较大。

连接条电阻与单体电池的连接形式有关。传统外露式铅连接条电阻比内部穿壁式、跨越式连接条的电阻要大。

一般来说,起动型铅蓄电池的内阻是很小的(单体电池的内阻约为 0.011Ω),在小负荷工作时对蓄电池的电力输出影响很小,但在大电流放电时(如起动发动机时),如内阻过大,则会引起端电压大幅度下降而影响起动性能。

1.5.3 效率

蓄电池的效率可以通过两种方法计算得出:额定容量效率和电能效率。

$$\text{额定容量效率} = \left(\frac{\text{放电时的额定容量}}{\text{充电时的额定容量}} \right) \times 100\% \quad (1.2-17)$$

在 20h 放电速率时,此值可以达到 90%。这个效率值

常被作为相对值引用,在这个例子中其值为1.1,被认为是充电因子。

$$\text{电能效率} = P_d t_d / (P_c t_c) \times 100\% \quad (1.2-18)$$

式中: P_d 为放电功率; t_d 为放电时间; P_c 为充电功率; t_c 为充电时间。

1.5.4 自放电

所有的蓄电池都会有自放电现象,也就是说即使没有外部电路,蓄电池电量也会有所下降。蓄电池通常每天以额定容量0.2%~1%的速度放电。这个数值随蓄电池所处环境温度及其使用年限的增加而增加。这主要由两个因素引起:首先是因为蓄电池内部的化学反应发生变化,由于隔板材料中锑与活性物质发生短路而形成电偶,用钙作为铅隔板的改进材料可以减小这种影响。电解液中的沉淀物,特别是诸如铁屑这样的金属屑也会引发自放电。其次,从蓄电池顶部泄漏的溶液也会引起蓄电池的自放电,特别是在蓄电池顶部有污垢时会更严重。酸形成的雾与灰尘微粒混合也会形成一个导体。密封的蓄电池则可以很好地解决这个问题。

1.5.5 充电特性

蓄电池的充电特性是指在恒流充电过程中,蓄电池的端电压 U 和电解液密度 ρ 随充电时间变化的规律。蓄电池的充电特性曲线如图1.2-4所示。

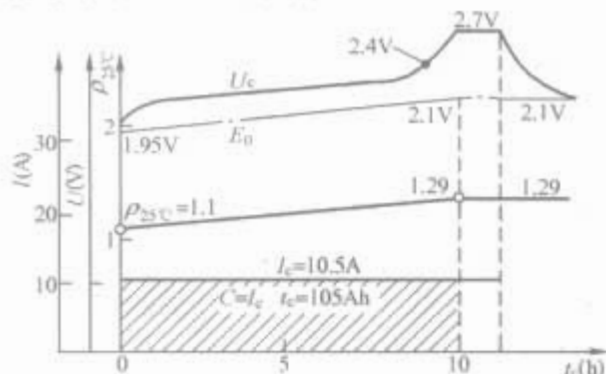


图 1.2-4 蓄电池的充电特性曲线

充电时,电源电压必须克服蓄电池的电动势和电池内阻的压降,因此充电过程中,蓄电池的端电压总是大于电动势,即

$$U = E + I_c R_0 \quad (1.2-19)$$

从图1.2-4可以看出,由于恒流充电,单位时间内所生成的硫酸相等,所以电解液密度曲线是随时间而直线上升的。蓄电池单格端电压的变化规律大致可分为三个阶段:

(1) 开始充电阶段(2.0~2.1V)。开始接通充电电流时,极板孔隙表层迅速生成硫酸,使孔隙中电解液的密度增大,因此,蓄电池单格端电压迅速上升。

(2) 稳定上升阶段(2.1~2.3V)。蓄电池单格端电压上升到2.1V以后,孔隙内硫酸向外扩散,当继续充电至孔隙内硫酸所产生的速度和向外扩散的速度达到平衡时,蓄电池的端电压就不再上升,而是随着整个容器内电解液密度的上升而相应提高。

(3) 迅速上升阶段(2.3~2.7V)。当蓄电池单格电压达到2.3~2.4V时,极板外层的活性物质基本都恢复为 PbO_2 和 Pb 了,继续充电,便使电解液中水电解,产生 H_2 和 O_2 ,以气泡形式出现,形成“沸腾”现象。由于产生的 H_2 以离子状态 H^+ 集结在溶液中负极板处,来不及立即全部变成气泡放出,使得溶液与极板之间产生约0.33V的附加电压,因而使得蓄电池单格端电压 U 上升至2.7V左右。此时应切断电源,停止充电,否则将会造成“过充电”。长时间过充电易加速极板活性物质的脱落,使极板过早损坏,

因此必须避免。

在实际使用中,为保证将蓄电池充足电,往往在出现沸腾之后,再继续充电2~3h,注意测量端电压和电解液密度,如果不再增加,才停止充电。充电停止后由于充电电流为零,端电压迅速回落,极板孔隙内电解液和容器中的电解液密度趋于平衡,因而蓄电池端电压又降至2.11V左右。

蓄电池在充电终了时(充足电)有如下特征:蓄电池内产生大量气泡,即出现“沸腾”现象;端电压上升至最大值,且两个小时内不再增加;电解液密度上升至最大值,且2~3h内不再增加。

蓄电池充足电后,若继续充电,只对水起分解作用。使电解液中的水分子分解为氢离子和氧离子。氢离子带正电,游向负极板获得电子,变成氢分子逸出;氧离子带负电,游向正极板失去电子,变为氧分子逸出。大量的气体逸出,使电解液产生“沸腾”。因而,在蓄电池使用或充电时,其加液塞上的通气孔,必须经常检查,保持通畅。

1.5.6 放电特性

蓄电池的放电特性是指恒流放电过程中,蓄电池的端电压 U 和电解液密度 ρ 随时间变化的规律。蓄电池的放电特性曲线如图1.2-5所示。

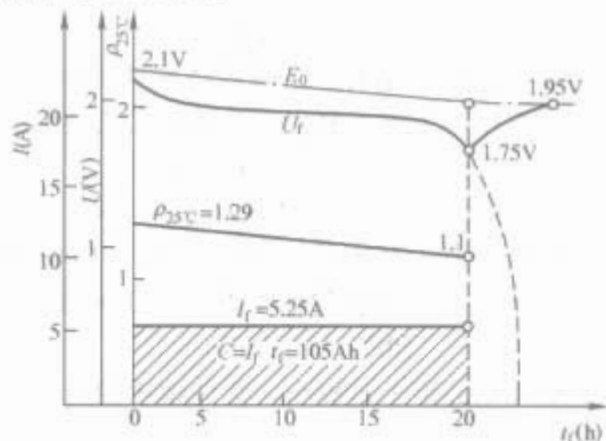


图 1.2-5 蓄电池的放电特性曲线

由于放电过程中电流是恒定的,单位时间内消耗的硫酸量是相同的,因而电解液密度随时间直线下降。因电动势和密度成正比,故电动势也直线下降,在图1.2-5中,电动势和密度形成两条几乎平行的直线。电解液密度每下降0.04g/cm³,蓄电池放电25%左右。

放电时,由于蓄电池内阻 R_0 上有压降 $I_f R_0$,则蓄电池端电压 U 总小于其电动势 E ,即

$$U = E - I_f R_0 \quad (1.2-20)$$

从图1.2-5可以看出,随着放电时间的增长,蓄电池单格端电压将逐渐下降,其变化规律也大致可分为三个阶段:

(1) 开始放电阶段(2.1~2.0V)。放电一开始,首先消耗极板与电解液接触界面处的 H^+ 和 HSO_4^- 。由于 HSO_4^- 的迁移较慢,产生浓差极化。使界面附近的相对密度迅速下降,电动势和端电压也很快下降。

(2) 相对稳定阶段(2.0~1.85V)。由于极板与电解液接触界面附近的密度下降,产生了浓度梯度和离子扩散运动,其速度虽浓度差的增加而增加,但随扩散距离的增加而降低。在本阶段,两者的作用相互抵消,再加上电迁移的作用,使极板与电解液接触界面处离子的消耗与补充接近平衡,即达到相对稳定阶段。这个阶段电压虽从2.00V降到1.85V,但时间较长,约占整个放电时间的90%。

(3) 迅速下降阶段(1.85~1.75V):由于放电接近终了时,化学反应渗入到极板内层,而放电时生成的硫酸铅较原来的活性物质的体积大(是 PbO_2 的1.86倍、 Pb 的2.68

倍),硫酸铅聚集在极板孔隙内,缩小了孔隙的截面积,使电解液渗入困难,因而极板孔隙内消耗的硫酸难以补充,孔隙内的电解液密度便迅速下降,端电压也随之急剧下降。

蓄电池单格的端电压下降至一定值时(以20h放电率放电,单格电压降至1.75V),再继续放电即为过度放电。过度放电对蓄电池十分有害,易使极板损坏。此时应停止放电,由于极板孔隙中的电解液和容器中的电解液相互渗透,趋于平衡,蓄电池的端电压将会有所回升。

蓄电池放电终止的特征是:单格电压放电至终止电压(以20h放电率放电,单格电压降至1.75V),电解液密度降至最小许可值(约1.11g/cm³)。

蓄电池允许的放电终止电压与放电电流强度有关,放电电流越大,则放完电的时间越短,而允许的放电终止电压越低。

1.6 蓄电池容量及其影响因素

蓄电池作为可逆电源,有很多技术性能指标,其中最重要的就是蓄电池容量。选用蓄电池时,主要是选取较为合适的蓄电池容量。

1.6.1 蓄电池容量

蓄电池的容量是指在规定条件下,充足电的蓄电池所能输出的电量,用C表示,单位为A·h。容量C等于放电电流I_t乘以放电时间t,即

$$C=I_t t \tag{1.2-21}$$

蓄电池的容量与放电电流的大小、终止电压和电解液的温度有关。因此,蓄电池出厂时规定的标称容量,是在一定的放电电流、一定的终止电压和一定的电解液温度下取得的。按国家标准GB/T 5008.1—2005《起动用铅酸蓄电池技术条件》规定,蓄电池的容量可以用20h率额定容量表示,也可以用储备容量来表示。

1.6.1.1 20h率额定容量

20h率额定容量指蓄电池完全充电结束后1~5h,当电解液温度为(25±5)℃时,以20h放电率的电流I₂₀连续放电,直至12V蓄电池端电压下降到(10.50±0.05)V时所输出的电量。

20h率实际容量,设上述20h率放电的持续时间为t,则20h率实际容量C_e为

$$C_e=I_{20} t[1-0.01(T-25)] \tag{1.2-22}$$

式中:T为放电终止时中间单体蓄电池电解液温度,℃;0.01为温度系数。

1.6.1.2 储备容量

储备容量是指蓄电池完全充电结束后1~5h,当电解液温度为(25±2)℃时,以25A电流放电到12V蓄电池端电压达到(10.50±0.05)V时,所输出的电量,用C_{r,n}表示。

储备容量与20h率容量C₂₀之间的关系为

$$C_{r,n}=\beta(C_{20})^\alpha \tag{1.2-23}$$

式中:α=1.170(免维护式蓄电池)或α=1.130(阀控式蓄电池);β=0.830(免维护式蓄电池)或β=1.070(阀控式蓄电池)。

总之,蓄电池的容量就是指外界能从其中获得电能的大小,通常以额定容量和储备容量表示。一个40Ah容量的蓄电池是指它能以2A的放电电流供电20h;储备容量是指蓄电池在25℃时以25A放电电流供电的时间(以分钟计)。

1.6.2 影响蓄电池容量的因素

蓄电池的容量与很多因素有关,其中主要因素有放电电

流,电解液的温度、密度、纯度及极板的结构等,现分述如下。

1.6.2.1 结构因素

结构因素的问题一般都出在极板上,极板的问题都出在活性物质上。在不增加容积的前提下,提高蓄电池容量有两种方法:提高活性物质孔率和增加极板表面积。就工艺水平来说,再提高活性物质的孔率较为困难,而减小极板的厚度比较容易实现。

化学反应是在固态的活性物质与液态的电解质之间进行的,实际上是在其界面间进行的。提高活性物质的孔率,也能有效地增加界面,提高活性物质的利用率,增加蓄电池容量。

国产蓄电池尺寸已统一,若已知极板数量,则蓄电池容量为

$$C_{20}=7.5(N-1) \tag{1.2-24}$$

式中:C₂₀为额定容量,Ah;N为正负极板总片数。

1.6.2.2 放电电流

随着放电电流的加大,蓄电池的容量和端电压将随之减小。在放电时,正、负极板的活性物质二氧化铅和铅,都要转变为硫酸铅。硫酸铅的体积较活性物质的体积大,电流过大时,电解液来不及渗入极板内部,就被表面生成的硫酸铅堵塞,使极板内部大量的活性物质不能参加化学反应,活性物质利用率降低,使蓄电池的容量下降。图1.2-6是6-Q-135型蓄电池在各种放电电流情况下不同的放电特性。

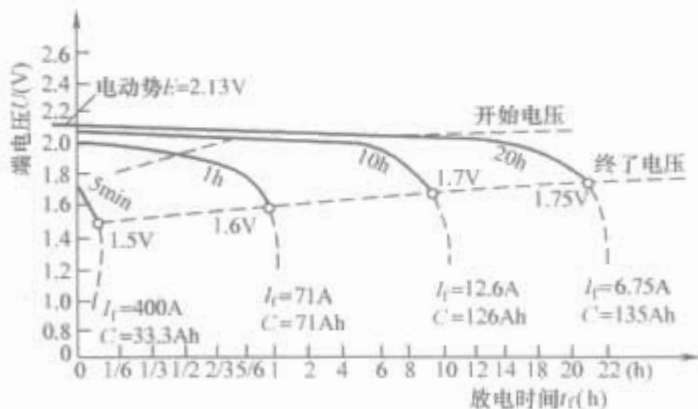


图 1.2-6 6-Q-135 型蓄电池在不同放电电流情况下的放电特性

当放电电流增大时,化学反应速度加快,硫酸铅阻塞孔隙的速度也加快,孔隙中硫酸浓度下降很快,使蓄电池容量很快下降。放电电流越大、端电压下降越快,达到终止电压的时间越短,电容量就越小。图1.2-7是3-Q-75型蓄电池电解液温度为30℃时容量与放电电流的关系。

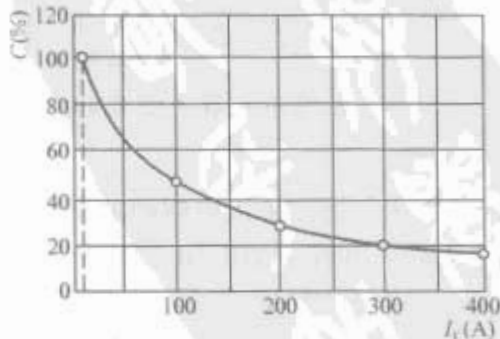


图 1.2-7 3-Q-75 型蓄电池容量与放电电流的关系

由于放电电流过大直接影响蓄电池的容量,汽车上规定每次使用起动机(蓄电池大电流放电)的时间不应超过5s,再次启动时应间歇15s以上,以便使电解液充分渗透,使更多的活性物质参加反应,否则会导致蓄电池容量减小,使用

寿命缩短。

1.6.2.3 电解液温度

在一定的放电电流下，蓄电池端电压取决于电动势 E 和内阻 R_0 。其中，内阻 R_0 对端电压影响很大。当电解液的温度变化时，电阻将随温度降低而显著增加，这是由于电解液黏度增大和电化学反应速度下降的缘故。隔板的电阻取决于它的渗透性，凡随电解液温度下降而渗透性降低的隔板，电阻都会增大。

温度低时，电解液黏度增加，离子运动速度慢，电解液向极板孔隙内层渗入困难，极板孔隙内的活性物质不能充分利用，使蓄电池的容量下降。图 1.2-8 所示为当电解液温度为 30°C 和 -18°C ，以 225A 的电流放电时，3-Q-75 型蓄电池端电压和放电时间的关系。

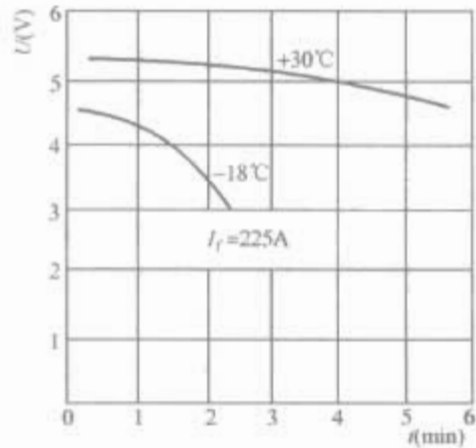


图 1.2-8 温度对放电特性的影响

图 1.2-9 所示为 3-Q-75 型蓄电池以 225A 的电流放电，在不同温度下所输出的容量。

一般情况下，当电解液温度低于 30°C 时，温度每降低 1°C ，小电流放电时蓄电池容量减少 1% ，大电流放电时容量减小 2% 。冬季用起动机启动汽车时，放电电流大，湿度又低，使蓄电池容量大大减小，这是冬季启动时感到蓄电池电量不足的主要原因之一。一般电解液温度控制在 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，最高不超过 35°C 。由于温度对蓄电池的容量及端电压影响较大，所以北方冬季应注意蓄电池的保暖工作。

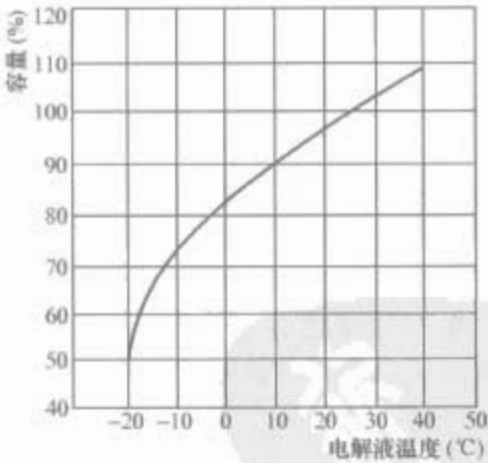


图 1.2-9 容量与电解液温度的关系

1.6.2.4 电解液密度

在一定的范围内，适当加大电解液的密度，可以提高蓄电池的电动势及减小电解液的电阻，而使蓄电池的容量增加。但密度过大，将使其黏度增加，若密度超过某一值时，可使渗透能力降低，内阻增大，容量减小。蓄电池的容量与电解液密度的关系如图 1.2-10 所示。

另外，电解液密度过高，蓄电池自行放电速度加快，并对极板栅架和隔板的腐蚀作用加剧，缩短蓄电池的使用寿命。一般情况下，采用电解液的密度偏低有利于提高放电电流和容量，同时也有利于延长蓄电池的使用寿命。蓄电池电

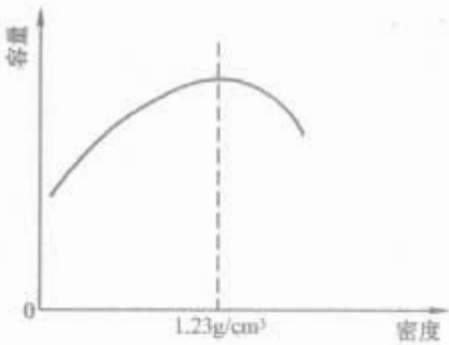


图 1.2-10 容量与电解液密度的关系

解液的密度应根据用户所在地区的气候条件不同而异，冬季在不致结冰的条件下，尽可能使用密度稍低的电解液。

1.6.2.5 电解液纯度

电解液的纯度对蓄电池的容量有很大影响，因此电解液应用化学纯硫酸和蒸馏水配制。电解液中一些有害杂质腐蚀栅架，沉浮于极板上的杂质形成局部电池产生自放电。如果电解液中含有 1% 的铁，蓄电池在一夜内就会放完电。所以纯度不好的电解液明显减小蓄电池的容量，缩短蓄电池的使用寿命。

1.7 蓄电池的故障及其排除

蓄电池除了开路 and 短路故障以外，还有其他的外部 and 内部故障。外部故障有壳体或盖子开裂、封口干裂、极柱松动或腐蚀等；内部故障有极板硫化、自放电、内部短路、活性物质脱落、极板拱曲等。

1.7.1 极板硫化

1.7.1.1 现象与特征

蓄电池长期充电不足，或放电后长期未充电。极板上会逐渐生成一层白色粗晶粒的硫酸铅，正常充电不能使其转化为二氧化铅和海绵状铅。这种现象称为“硫酸铅化”或“不可逆硫酸盐化”，简称“硫化”，是蓄电池早期损坏的主要原因。

蓄电池硫化的主要表现：极板上有较厚的白霜，容量显著下降；充、放电时会有异常现象。充电时，电压很快升高，达到“沸腾”，但密度增加很少；放电时电压很快下降，灯光暗淡，启动无力。

1.7.1.2 原因

- (1) 长期欠充电。即长期充电不足，或放电后未及时充电。当温度变化时，硫酸铅发生结晶，逐渐形成粗大晶粒。
- (2) 电池液面过低，极板上部与空气接触而强烈氧化。由于汽车在行驶中，电解液上下波动与极板氧化部分接触，也会生成大晶粒的硫酸铅，渐渐使极板硫化。
- (3) 电解液密度过高，有害杂质含量大，使极板上生成的硫酸铅难溶于电解液中，形成极板硫化。
- (4) 蓄电池经常过量放电或小电流深放电，在极板活性物质细孔内部生成平时充电不易恢复的硫酸铅。

1.7.1.3 处理和预防措施

对于已经硫化的铅蓄电池，轻度硫化的，用间歇充电方法消除。硫化比较严重的，采取去硫化充电方法排除。快速充电有显著消除硫化的作用。硫化很严重时，只能更换极板或报废。预防极板硫化主要有以下几方面：

- (1) 经常保持汽车上充电系统的工作正常，发现发电机及调节器出现故障时，要及时修复，尽可能使蓄电池经常处于充足电状态。
- (2) 定期检查电解液液面高度，保持液面高出极板上缘 $10\sim 15\text{mm}$ 。发现液面降低，及时补加蒸馏水。

(3) 应根据季节和地区的差异,正确选用电解液密度。

(4) 蓄电池应在适宜的条件下放置,存放时间超过一个月,每月应补充充电一次。

1.7.2 自放电

1.7.2.1 原因

充足电的蓄电池,处于静置不工作时,其容量自行损耗的现象称为自放电。一般充足电的蓄电池在24h损耗的电量不超过 C_{20} 的0.7%时,属于正常的自放电。若在24h内超出了耗电限额,则属于故障性自放电。

引起蓄电池自放电的原因归纳起来主要有以下几个方面:

(1) 蓄电池材料不纯,内部含有杂质引起自放电,这是主要原因。杂质与极板、杂质与杂质之间产生电位差,形成闭合的局部电池,产生局部电流,使蓄电池自放电。特别是混入那些比铅电位高的金属杂质危害更大。例如,铜混入电解液,它吸附于负极板上与铅组成一个小电池。铜为正极,铅为负极。电流由铜到铅,再经过电解液回到铜,构成闭合电路而自行放电。此外,铁、锰、硝酸、氯和一些有机物杂质,都能引起自放电。

(2) 正极板二氧化铅的分解和负极板铅的自溶形成自放电。正极板的二氧化铅,会自发地还原成硫酸铅,并析出氧气,从而引起自放电。特别是硫酸铅浓度增大时,反应速度将增大。在负极板,由于纯铅自溶也会造成自放电。如果负极上没有催化杂质,氢气产生很缓慢,可以忽略。若负极有银、铜、砷、锡等杂质,则形成强烈的气相催化作用,使自放电加剧。

(3) 栅架与有效物质接触,引起自放电。由于栅架材料中含有锑,正极板上二氧化铅与栅架中的锑相接触也会引起自放电。特别当正极板上的活性物质脱落使栅架外露时,栅架上锡与电解液直接接触,更会使上述反应加剧。

(4) 蓄电池盖上积存有电解液、油污等引起自放电。电解液积存在盖板上时,使正、负极柱形成通路而放电。

(5) 电解液浓度差引起自放电。由于硫酸下沉,使电解液下部密度比上部密度大,使极板上下部产生电位差,引起自放电。

(6) 蓄电池内部短路引起自放电。极板上的活性物质脱落,下部沉积物过多,使极板短路;隔板炭化、变脆,以致损坏,也会使极板短路,造成自放电。

正极板自放电的速度比负极板慢,不起决定性作用。负极板的自放电主要是由于铅在硫酸中的自发溶解造成的。当电解液密度在一定范围内增大时,反应速度加快,自放电加剧。当温度升高时,反应速度也加快,自放电速度也随之加快。

1.7.2.2 预防及排除

完全消除自放电是不可能的,从使用维护方面来说,所能做的工作,就是尽量减少自放电。具体措施有以下几个方面:

(1) 蓄电池添加电解液,务必使用纯净的蓄电池专用硫酸和蒸馏水,并按要求配制。操作过程中,要确保无杂质污染。器皿、用具必须用玻璃、塑料、橡胶等制成,并用蒸馏水清洗干净。

(2) 蓄电池的加液孔盖下的橡胶密封圈必须完好无损,保持盖板无积液、无脏污。电解液应高于极板上缘10~15mm。加液孔盖应保持清洁,盖上的通气孔应保持畅通,使充电过程中产生的氢气、氧气及时排出。

(3) 根据季节的变化,及时调节电解液密度。无结冰危险的地区、季节,尽量采用密度偏低的电解液。夏季停车,最好能选择阴凉通风处,以降低自放电。

(4) 严禁蓄电池结冰及经常大电流放电,避免活性物质

脱落,造成极板短路。

(5) 自放电严重的蓄电池应及时处理。具体方法是将蓄电池内部的电解液全部倒出,烫开封口胶,取出极板组;用蒸馏水清洗极板和隔板,清洗壳体;加入纯净的电解液,重新充电。

1.7.3 极板短路

隔板损坏、极板拱曲或活性物质大量沉积在底部,都会造成极板的短路。极板短路的现象表现为蓄电池电动势很低,甚至为零。充电时,电解液温度迅速升高,电压和密度上升很慢。充电后期,气泡很少。

极板短路的蓄电池,必须拆开修理。

1.7.4 极板活性物质大量脱落

由于正极板的化学反应较激烈,其上的活性物质常大量脱落,主要原因是:

(1) 充电电流过大,电解液温度过高,造成活性物质松软。

(2) 经常过充电,使极板孔隙中逸出大量气体,对极板孔隙造成压力。

(3) 起动时间过长,长时间大电流放电,使极板拱曲、变形。

(4) 蓄电池安装不善,无缓冲防振装置,承受不了汽车行驶中的剧烈振动。

活性物质大量脱落表现为电解液混浊,有褐色悬浮物;蓄电池端电压下降,容量不足,起动无力。

对活性物质脱落的蓄电池,若沉淀物不多,应彻底清洗,重新充电;沉淀物多者,说明极板损坏严重,应予以更换。

1.7.5 极板拱曲

极板拱曲多发生于正极板,极板拱曲后将会造成内部短路等故障。造成极板拱曲的原因主要有:

(1) 极板在制造过程中铅膏涂抹不匀,使充、放电时极板各部分所引起的电化学反应强弱不均,致使极板膨胀和收缩不一样。

(2) 长时间大电流放电,活性物质迅速膨胀,使极板局部的体积变化不一致。

(3) 蓄电池过量放电时,极板内层深处生成硫酸铅,充电时得不到恢复,造成内部膨胀而导致极板拱曲。

(4) 电解液中含有杂质,在引起局部电化学作用时,仅有小部分活性物质转变为硫酸铅,致使整个极板的活性物质体积变化不一致也会造成极板拱曲。

极板轻度拱曲时,可用木夹板夹紧校正,如极板拱曲严重,则应更换新极板。

1.7.6 外壳裂损、变形与封口胶破裂

汽车行驶中,由于强烈的震动或击伤,会使蓄电池外壳破裂;另外蓄电池发热,气体压力过大或电解液冰冻膨胀,也会使外壳变形或封口胶破裂。封口胶裂口可以重新填补,外壳破裂需更换新外壳。

除上述几种常见故障外,还有负极板硬化、钝化和收缩,正极板栅架腐蚀、单体电池极性颠倒、电解液非正常减少等故障。蓄电池故障除少数由于质量差造成外,大多数是使用维护不当所致。因此,为避免蓄电池过早损坏,应严格按照规定正确使用和维护好蓄电池。

由于现代的蓄电池很难进行维修,出现问题时通常需要更换新的蓄电池。

1.8 蓄电池的充电和充电方法

1.8.1 蓄电池的充电

1.8.1.1 初充电

新蓄电池或修复后的蓄电池在使用之前的首次充电称为初充电，其目的在于恢复蓄电池在存放期间极板上部分活性物质缓慢硫化和自放电而失去的电量。初充电的特点是充电电流小、充电时间长，电化学反应充分。

初充电过程如下：首先按蓄电池制造厂的规定，加注一定相对密度的电解液（一般为 $1.25\sim 1.28\text{g/cm}^3$ ）。电解液加入蓄电池之前温度不得超过 30°C ，注入电解液后应静置 $3\sim 5\text{h}$ ，待温度低于 35°C 才能充电。此时若液面因电解液渗入极板而低落，应补充到高出极板上缘 15mm 。然后将蓄电池接入充电机，按表 1.2-4 蓄电池充电规范的初充电电流进行充电。因为新蓄电池在储存中可能有一部分硫化，充电时易于过热，所以初充电一般应选用较小的电流。充电过程通常分两个阶段：第一阶段的充电电流约为额定容量的 $1/15$ ，充电至电解液中放出气泡，单体电池端电压达 2.4V 为止；第二阶段将充电电流减半，继续充电到电解液剧烈放出气泡，即“沸腾”，相对密度和电压连续 2h 稳定不变为止。全部充电时间为 $45\sim 65\text{h}$ 。

表 1.2-4 蓄电池充电规范

蓄电池型号	初次充电				补充充电			
	第一阶段		第二阶段		第一阶段		第二阶段	
	电流 (A)	时间 (h)	电流 (A)	时间 (h)	电流 (A)	时间 (h)	电流 (A)	时间 (h)
3-Q-75	5	25~35	3	20~30	7.5	10~11	4	3~5
3-Q-90	6		3		9.0		5	
3-Q-105	7		4		10.5		5	
3-Q-120	8		4		12.0		6	
3-Q-135	9		5		13.5		7	
3-Q-150	10		5		15.0		7	
3-Q-195	13		7		19.5		10	
6-Q-60	4	25~35	2	20~30	6.0	10~11	3	3~5
6-Q-75	5		3		7.5		4	
6-Q-90	6		3		9.0		4	
6-Q-105	7		4		10.5		5	
6-Q-120	8		4		12.0		6	

充电过程中应经常测量电解液温度。若温度上升到 40°C ，应将电流减半；如继续上升到 45°C ，应立即停止充电，并采用人工冷却，待冷至 35°C 以下时再充。充电过程中如减少充电电流，则应适当延长充电时间。

初充电临近完毕时，应测量电解液的相对密度，如不合规定，应用蒸馏水或相对密度为 1.40g/cm^3 的电解液进行调整。调整后，应再充电 2h ，如相对密度仍不符合规定，应再调整并充电 2h ，直至符合规定为止，然后将加液孔塞拧上，把电池表面擦干净，即可使用。

如因电池存放时间过长，经过一次充放电循环，容量仍小于标称容量的 90% ，应再进行一次充放电循环，使极板在储存中生成的硫酸铅全部变为活性物质，以增加其容量。

对部分更换极板的蓄电池，修复后初充电时应灌入较规定相对密度低 $0.03\sim 0.06\text{g/cm}^3$ 的电解液，并按表 1.2-3 规定的初充电电流值的 $50\%\sim 80\%$ 进行充电。

对于新蓄电池的初充电作业，应进行 $1\sim 3$ 次充、放电循环，目的是检查它的容量是否达到额定容量，并促使极板上未转化的物质转变为活性物质，以提高蓄电池的容量。

1.8.1.2 补充充电

蓄电池在车辆上使用时，常有充电不足的现象，尤其是

短途运输车辆，当蓄电池的电量低于标称容量的 75% 时，则视为电量不足，应根据需要进行补充充电。蓄电池电量不足，有以下现象：电解液密度下降到 1.20 以下、单格电池电压接近 1.75V 、灯光比平时暗淡、起动无力。

另外，蓄电池放置时间超过一个月时应进行补充充电，以补偿自放电损失；当电解液消耗较多，补充大量蒸馏水后也应及时进行补充充电。

补充充电的电流值见表 1.2-4，也常分两阶段进行，方法和初充电相同，充电总时间为 $13\sim 16\text{h}$ 。

1.8.1.3 预防硫化过充电

蓄电池在使用中，常因充电不足而造成硫化。为预防起见，可每隔 3 个月进行一次预防硫化过充电，即比平常充电时间更长，充电更完全。方法是用平时补充充电的电流值将电池充足，中断 1h ，再用 $1/2$ 的补充充电电流值进行充电至“沸腾”为止。如此重复几次，直至刚接入充电，蓄电池立即“沸腾”为止。

1.8.1.4 锻炼循环充电

蓄电池在使用中常处于部分放电的情况，参加化学反应的活性物质有限，为迫使相当于额定容量的活性物质都能参加工作，以避免活性物质长期不工作而收缩，可每隔 3 个月进行一次锻炼循环充电，即在电池正常充足后，用 20h 放电率放完电，再正常充电后送出使用。

1.8.1.5 去硫充电

当极板硫化较严重时，可进行“去硫充电”。方法是先倒出电池内的电解液，用蒸馏水反复冲洗数次，然后灌入蒸馏水至高出极板上缘 15mm ，用初充电电流进行充电，并随时测量相对密度。如相对密度升到 1.15g/cm^3 以上时，可用蒸馏水冲淡，继续充电至相对密度不再上升后进行放电。如此反复多次，或充 6h ，中间停 2h ，反复进行至 6h 相对密度不变为止，最后参照初充电方法充电并调整相对密度至规定值，用 20h 放电率放电检查容量，如容量达到额定容量的 80% 时，说明硫化已基本消除，即可使用。

1.8.2 充电方法

通常蓄电池的充电方法有恒流充电和恒压充电两种，近年来脉冲快速充电方法也被逐步推广。

1.8.2.1 恒流充电

在充电过程中，充电电流保持恒定的充电方法称为恒流充电，如图 1.2-11 所示。由于充电电流 $I_c = (U - E) / R_0$ ，所以随着蓄电池电动势 E 的升高，要保持充电电流恒定，必须逐步提高充电电压 U 。当每单体电池的端电压升高到 2.4V 时气体开始形成，应将充电电流减少一半，直到蓄电池完全充足电。 R_0 是蓄电池的内阻。

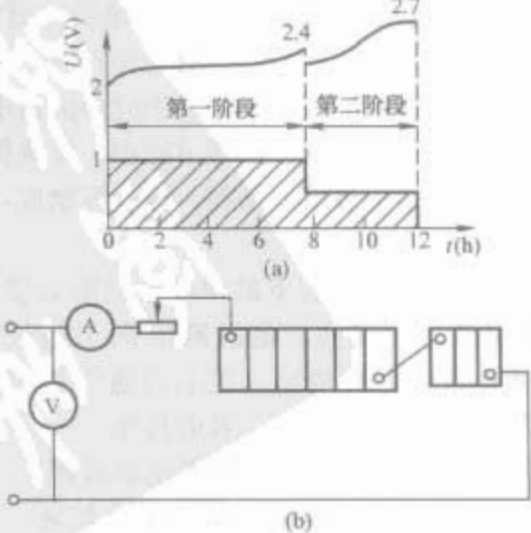


图 1.2-11 恒流充电
(a) 充电特性曲线；(b) 线路连接简图

采用恒流充电时，被充电的蓄电池不论是 6V 或 12V 都可串联在一起，如图 1.2-11 (b) 所示。充电时，每个单体需要 2.7V，故串联的单体电池总数不应超过 $n=U_c/2.7$ ，(U_c 为充电机的额定电压)，则串联 6V 蓄电池的数目为 $n_1=U_c/(2.7\times 3)$ 。

所串联的蓄电池最好容量相同，否则充电电流的大小必须按照容量最小的蓄电池来选定，待其充足电后先摘除，再改用大容量的充电电流继续充电。

恒流充电有较大的适应性，可以任意选择和调整充电电流，因此可对各种不同情况的蓄电池充电，如新蓄电池的初充电、普通充电，以及去硫充电均可采用这种方法。但它的缺点是充电时间长，并且需要经常调节充电电流。

1.8.2.2 恒压充电

充电过程中，电源电压始终保持不变的充电方法称为恒压充电，如图 1.2-12 所示。在恒压充电开始时，充电电流很大。此后随着蓄电池电动势的增大，充电电流逐渐减小，至充电终止时，充电电流将自动降低到零，这样可不必由人照管。另外，恒压充电时，充电电流很大，开始充电后 4~5h 内蓄电池就可获得本身容量的 90%~95%，因而可大大缩短充电时间。由于恒压充电时间短，无需照管且经济性好，所以较适合蓄电池的补充充电，因而被汽车维修厂家广泛采用。但恒压充电时，不能调整充电电流的大小，所以不能用于蓄电池的初充电，也不能用来消除硫化，并且要求所有充电的蓄电池电压必须相同才行。

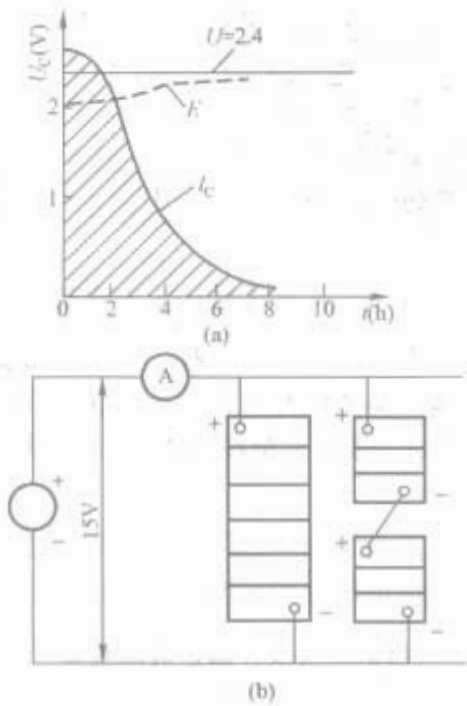


图 1.2-12 恒压充电
(a) 充电特性曲线；(b) 线路连接简图

采用恒压充电时，要选择好充电电压。若电压过高，不但充电初期充电电流过大，且会发生过充电现象，以致引起极板弯曲、活性物质大量脱落、蓄电池温升过高的现象；若充电电压过低，则会使蓄电池不能充电。一般每单体电池约需 2.5V，即对 6V 蓄电池充电，充电电源的电压应为 7.5V；对 12V 蓄电池充电，电源电压应为 15V，且被充电的蓄电池必须并联在充电电源之间。

由于汽车上的蓄电池和发电机是并联的，所以蓄电池始终是在发电机的恒定电压（通过调节器调整）下进行充电的。

1.8.2.3 脉冲快速充电

上述的恒流和恒压充电方法统称为“常规充电”，要完成一次初充电需 60~70h，补充充电也要 20h 左右。由于充电的时间太长，给使用带来很大不便。但是，单纯加大充电电流

来缩短充电时间是行不通的，因为这样不仅使充电时蓄电池达不到额定容量，反而会使蓄电池温升快、产生大量气泡，造成活性物质脱落而影响其使用寿命。20 世纪 50 年代初国外已开始研究快速充电技术，探寻其理论基础。近年来我国快速充电技术也发展很快，已研制成功并生产了晶闸管快速充电机。新蓄电池初充电一般不超过 5h，旧蓄电池补充充电只需 0.5~1.5h，大大缩短了充电时间，提高了效率。

脉冲快速充电方法的电流波形如图 1.2-13 所示，先用 0.8~1C₂₀ 的大电流对蓄电池进行恒流充电，使蓄电池在较短的时间内达到额定容量的 60% 左右。当单格电压上升到 2.4V，水开始分解而冒气泡时，由控制电路控制，开始用脉冲电流对蓄电池进行充电。先停止充电 24~40ms（称为前停充），停充后随着电流的消失，则欧姆极化消失，浓差极化也因扩散作用而部分消失。接着再放电，使蓄电池反向通过一个较大的脉冲电流（脉冲宽度为 0.15~1ms，脉冲深度为 1.5~3 倍的充电电流），目的是消除电化学极化中产生的电荷积累，同时消除极板孔隙中形成的气体，帮助浓差极化进一步消失，然后再停止放电 25ms（称为后停充）。以后的过程一直为正脉冲充电—前停充—负脉冲瞬间放电—后停充—再正脉冲充电的循环过程，直至充足。

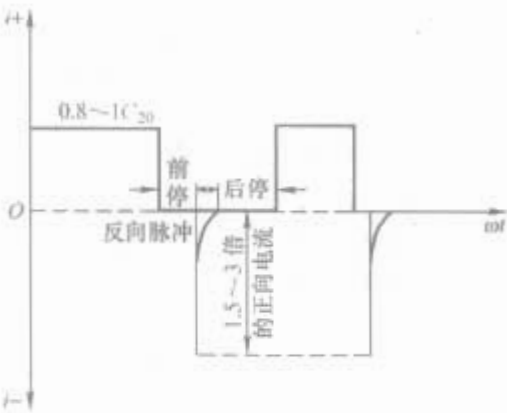


图 1.2-13 脉冲快速充电的电流波形

脉冲快速充电的优点是：①充电时间大为缩短，一般初充电不多于 5h，补充充电不多于 1h；②能够消除极化，充电时化学反应充分，加深了反应深度，使蓄电池容量有所增加；③具有显著的去硫化作用。缺点是采用脉冲快速充电时，蓄电池析出气体总量虽然减小，但其出气率高，对极板活性物质的冲刷力强，活性物质易脱落，因此对蓄电池寿命有一定的影响。

1.9 蓄电池的使用与维护

1.9.1 蓄电池的正确使用

- (1) 大电流放电时间不宜过长，使用起动机每次的时间不超过 5s，相邻两次起动之间应间隔 15s。
- (2) 充电电压不能过高，当充电电压增高 10%~12% 时，蓄电池寿命将会缩短 2/3 左右。
- (3) 尽量避免蓄电池过放电和长期处于欠充电状态下工作，放完电的蓄电池应在 24h 内充电。
- (4) 冬季使用蓄电池，要始终保持蓄电池在充足电的状态下，以免电解液密度降低而结冰，导致壳体破裂，极板弯曲和活性物质脱落等。冷车起动前，注意发动机的预热。长时间停车，最好进入车库或用篷布遮盖，特别是夜间停车时。

1.9.2 蓄电池的维护

为了使蓄电池经常处于完好的技术状态，对正在使用的蓄电池，应做好下列维护工作：

- (1) 观察蓄电池外表面，看有无裂纹和电解液泄漏。

- (2) 检查蓄电池在车上安装是否牢靠，极柱是否晃动，接线是否紧固。
- (3) 经常清除电池上的灰尘、泥土和极柱、电线头上的氧化物，擦去电池上部及外表面的电液、污物，疏通加液盖上的通气孔。
- (4) 定期检查蓄电池电解液的密度及液面高度。
- (5) 经常检查蓄电池放电程度。如低于规定标准，要立即进行补充充电。

1.9.3 蓄电池的检查

汽车每行驶 1000km，或冬季每行驶 10~15 天，或夏季每行驶 5~6 天，对蓄电池应进行下列检查。

1.9.3.1 电解液液面高度检查

对不透明的蓄电池壳体，可用玻璃管测量。液面应高出极板上缘 10~15mm，具体方法如图 1.2-14 所示。对于塑料壳体，可直接由外部观测；电解液不足时，应加注蒸馏水，除非确知液面降低是由于电解液泼出所致，否则不许加入稀硫酸。

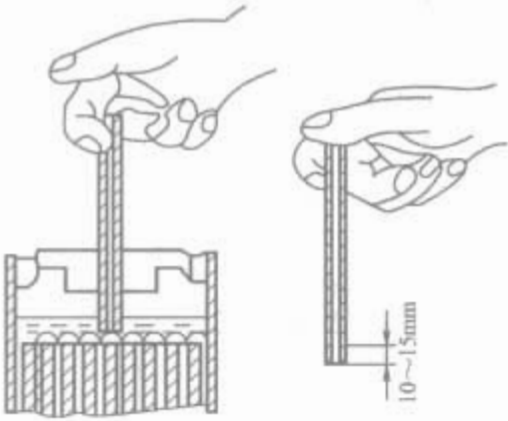


图 1.2-14 用玻璃管测量电解液液面高度

1.9.3.2 蓄电池放电程度的检查

(1) 测量电解液密度。用吸入式密度计测量，吸入的电解液量应使浮子完全浮起。注意，测量密度时应同时测量电解液温度，如图 1.2-15 所示。将所测得的电解液密度值按表 1.2-5 换算成 25℃时的密度，也可按式 (1.2-15) 换算。

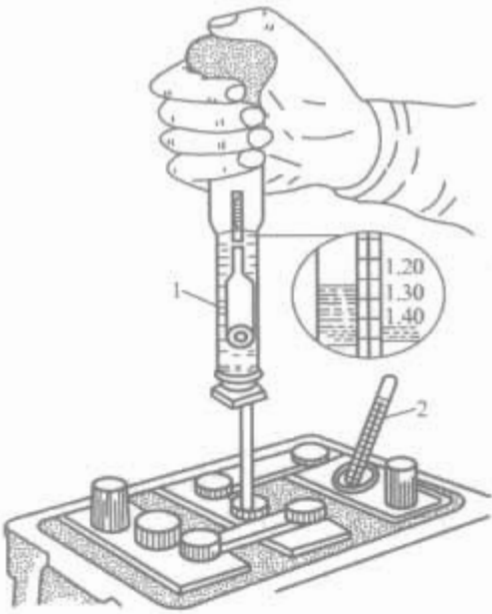


图 1.2-15 测量电解液的相对密度和温度
1—密度计；2—温度计

根据实际经验，密度每减小 0.01g/cm³，相当于电池放电 6%。据此，可判断蓄电池大致的放电程度。为保证所测数据准确，在强电流放电和加注蒸馏水后，不要立即测量电解液密度。

表 1.2-5 不同温度下密度计读数的修正值

电解液温度 (℃)	相对密度修正值 (g/cm ³)	电解液温度 (℃)	相对密度修正值 (g/cm ³)
+45	+0.0140	-5	-0.0210
+40	+0.0105	-10	-0.0245
+35	+0.0070	-15	-0.0280
+30	+0.0035	-20	-0.0315
+25	0	-25	-0.0350
+20	-0.0035	-30	-0.0385
+15	-0.0070	-35	-0.0420
+10	-0.0105	-40	-0.0455
+5	-0.0140	-45	-0.0490
0	-0.0175		

(2) 测量放电电压。用高率放电计测量大电流放电时的端电压，所测得的值，可判断蓄电池放电程度和起动能力。高率放电计外形和原理，如图 1.2-16 所示。

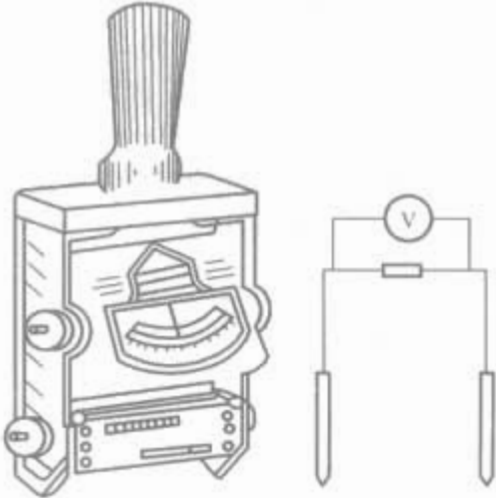


图 1.2-16 高率放电计及其原理图

高率放电计有一个 3V 电压表，一个定值负载电阻与其并联，测量时两叉尖紧压在单格电池的正、负极柱上，待表针稳定时（约 5s），读取大负荷放电情况下单格蓄电池所能保持的端电压。

装有放电电流为 100A 负载电阻的高率放电计，其所测得的单格电压与放电程度的对照见表 1.2-6。

表 1.2-6 用高率放电计测定放电程度

高率放电计测得的单体电 端电压 (V)	放电程度 (%)
1.7~1.8	0
1.6~1.7	25
1.5~1.6	50
1.4~1.5	75
1.2~1.4	100

一般技术状况良好的蓄电池，用高率放电计测量时，单格电压应在 1.5V 以上，并在 5s 以内保持稳定，如果某单格蓄电池在 5s 内电压迅速下降，或与其他单格电池电压相差 0.1V 以上时，说明该单格蓄电池有故障，应进行修理。

1.9.4 电解液密度的配制与选择

1.9.4.1 配制

配制电解液时，要用符合 HG/T 2692—2007《蓄电池用硫酸》规定的浓硫酸，符合 JB/T 10053—1999《铅酸蓄电池用水》规定的用水，按一定的体积比或质量比配制。

1.9.4.2 选择

电解液相对密度的选择对蓄电池的工作有很大影响,密度大可增大容量,不易结冰,但腐蚀极板,易硫化;密度小时,则相反。密度过分大时,因黏度增加,渗透困难,容量反而降低。一般根据不同地区和不同使用条件,选择不同密度的电解液。寒冷地区的电解液密度较温暖地区高。同一地区,冬季电解液密度较夏季高 $0.02\sim 0.04\text{g/cm}^3$ 。不同地区和气候条件下,电解液相对密度也不同。

1.9.5 蓄电池的储存

1.9.5.1 湿储存

蓄电池若暂不使用,需经处理方可储存。储存前,先将电池充足电,将密度调整至 1.270g/cm^3 ,液面达到正常高度,将加液孔盖的通气孔密封,放置于室内暗处。储存时间不宜超过6个月。储存期间,应经常检查电解液密度、液面高度、蓄电池容量。若容量下降 $1/4$,要立即进行补充充电。再次使用前,也应进行补充充电。

1.9.5.2 干储存

以20h放电率将蓄电池放完电,倒出全部电解液,用蒸馏水冲洗至水中无酸性,倒出水,晾干后旋紧加液塞盖,密封储存。重新启用时,按新电池处理。长时间不用的蓄电池,宜采用此法。

新蓄电池,其储存方法和储存时间,以出厂说明书为准。

1.9.5.3 储存环境条件

电池的保管,应符合以下环境条件:

- (1) 室温为 $5\sim 40^\circ\text{C}$,干燥、清洁、通风良好。
- (2) 不受阳光直射,离开热源不小于2m。
- (3) 避免与任何液体和有害物质接触,壳内切勿掉入金属杂质。
- (4) 不得倒放或卧放,不得受任何机械冲击和重压。

1.10 干荷电和湿荷电蓄电池

1.10.1 干荷电蓄电池

干荷电蓄电池在使用之前极板是干燥的,但能长期保存电荷。在规定的保存期内使用,只要加入适当密度的电解液,静置15min后,调整电解液至规定浓度,调整液面至规定高度,即可使用,不需要初充电。荷电量为额定容量的80%,是很好的后备电源。

传统蓄电池正极板的活性物质是二氧化铅,化学活性比较稳定,而其负极板上的活性物质海绵状铅,表面积大,活性高,易氧化。干荷电蓄电池的极板和空气长期接触,需采用不同于普通负极板的制造工艺才能避免其氧化,为此,在干荷电蓄电池负极板的铅膏中添加松香、油酸、硬脂酸等抗氧化剂。在化成过程中,进行一次深放电循环或锻炼循环,以使深层活性物质活化。之后,用清水冲洗,放入抗氧化剂溶液,即硼酸、水杨酸混合液进行浸泡,使负极板生成一种保护膜。最后,进行绝氧干燥、装配、密封。这样,使负极板的抗氧化能力大大提高。干荷电蓄电池的储存期较长。因极板不是浸泡在电解液中,很难形成自放电,干荷电蓄电池的维护,与普通电池基本一样。但如果储存期限已超过两年,因其极板已有部分氧化,交付使用之前,必须以补充充电电流充电 $5\sim 10\text{h}$ 。

1.10.2 湿荷电蓄电池

湿荷电蓄电池的极板采用群组化成,再放入密度为 1.350g/cm^3 的硫酸钠溶液中浸泡10min。该溶液中含有0.5%硫酸钠,它吸附在负极板活性物质表面,有抗氧化作

用。浸泡后,经离心沥酸,即进行组装、密封。极板和隔板内含有电解液,故名湿荷电蓄电池。

这种蓄电池的储存期限为6个月。在此期间使用,只需加入规定密度的电解液静置20min即可。不需初充电及调整密度和液面高度。超过此期限,需进行短时间补充充电方可使用。和干荷电蓄电池一样,湿荷电蓄电池的首次放电容量也可达额定容量的80%。

干荷电蓄电池和湿荷电蓄电池在出厂时因电池内未装硫酸溶液,极大地方便了运输与保管,且一般不需初充电,深受用户欢迎。

1.11 免维护蓄电池

免维护蓄电池即在合理的使用期限内无需维护,如在市区车辆上使用可行驶约8万km、在长途车上使用可行驶40万~48万km而不需进行维护。

1.11.1 免维护蓄电池的结构与机理

与普通铅蓄电池相比,免维护蓄电池主要是在极板栅架的材料上做了重大的改进,采用了低锑合金(含锑量小于2%~3%)或无锑合金栅架。普通铅蓄电池由于极板栅架中含有较多的锑(6%~8%),在电化学反应中,锑会不断地从正极板析出迁移到负极板表面沉积,并与负极板上的活性物质构成局部电池而导致自放电。同时,锑还使负极板的标准电极电位下降,使蓄电池的端电压下降(在充电末期,比栅架不含锑的蓄电池单格电压低 $0.1\sim 0.2\text{V}$),采用恒压充电时,充电电流增大,从而加剧了水的分解,出气提前、失水量增大。当栅架含锑量大于2%时析气量大幅度增加;而当含锑量小于2%时,则析气量较小。免维护蓄电池正是通过降低或消除栅架中锑的含量来达到免维护目的的。

根据极板栅架所用合金材料的不同,免维护蓄电池一般分为两种类型:①采用低锑多元合金,其含锑量在1%~3%,除含锑量减少外,还增加了铜、砷、锡、硒等合金元素,以改善因含锑量减少而造成栅架铸造和机械强度方面的不足;②铅钙合金或铅钙锡合金,含钙量在0.08%~0.1%,含锡量在0.3%~0.9%。

以铅钙合金作为极板栅架的免维护蓄电池,由于完全消除了锑的副作用,其自放电少,耐过充能力强,出气量和耗水量也非常小,因而在整个使用过程中无需加水,可以实现真正的免维护,所以称为真正的免维护蓄电池。近年来,一些新型免维护蓄电池已采用铅钙合金带拉伸成网状栅架,以取代传统的重力铸造方式,不仅栅架耐腐蚀,机械强度高,而且可使极板栅架的厚度减少到铸造栅架的60%,生产效率也有所提高,很有发展前途。

以低锑多元合金为栅架的免维护蓄电池,其自放电、耐过充及电解液损耗特性等均不如铅钙合金为栅架的免维护蓄电池,但明显优于普通蓄电池。这种蓄电池一般使用1年后才需补充蒸馏水,通常称为少维护蓄电池,其栅架的铸造性能和机械强度均优于铅钙合金。就我国来讲,适合现有的制造条件,而且能达到少维护或免维护的要求。我国大多数厂家生产的免维护蓄电池实际上就是这种少维护蓄电池。

除了上述在极板栅架材料和制造方面的特点外,免维护蓄电池还有以下结构特点:

(1) 隔板采用袋式微孔聚氯乙烯隔板将正极板包住,可保护正极板上的活性物质不致脱落,防止极板短路,这样可取消壳体内底部的凸筋,使极板上部容积增大,提高了电解液的储存量。

(2) 通气孔采用新型安全的通气装置和气体收集器,可

避免聚集在蓄电池顶部的酸气析出，与外部火花接触产生爆炸。有的免维护蓄电池的通气塞中还装有催化剂钯，它可将析出的绝大部分氢、氧气体再结合成为水蒸气，经冷凝而成水滴后返回蓄电池内部，从而进一步减少了水的消耗，还可使蓄电池盖和接线极柱保持清洁，减少了极柱的腐蚀。国内生产的免维护蓄电池，其加液孔盖上的通气孔多采用迷宫式排气结构，在很大程度上也可减少电解液的蒸发。

(3) 单体电池间的连接采用穿壁式贯通连接，使内阻减小，输出电流增大。同时采用聚丙烯塑料热压外壳和整体式电池盖，壳体内壁薄，储液多，与同容量蓄电池相比，重量轻、体积小。

(4) 对于无加液孔的全密封型免维护蓄电池，由于不能采用传统的密度计来测量电解液相对密度以判断其技术状况，为此，在这种免维护蓄电池顶上一一般常装有一只小型密度计，如图 1.2-17 所示。在内装式密度计中有一个玻璃棒，它伸入电解液中，下端连接一个笼子，其中有一个绿色小球，随着蓄电池充电程度的变化，绿色小球在笼子中上下移动。当相对密度为 $1.220\text{g}/\text{cm}^3$ 或较高时（充电程度在 65% 以上），绿色小球升至笼子的顶部并与玻璃棒的下端接触，在其顶端检视窗口就会看到绿点，表示蓄电池工作情况良好，如图 1.2-17 (a) 所示；如果看到的为深绿色，表示小球下降到笼子的底部 [见图 1.2-17 (b)]，说明电解液相对密度降低，蓄电池充电不足，应及时充电；如果电解液液面已下降到低于内装小型密度计，则检视窗显示浅黄色（或无色），说明蓄电池已无法正常工作，必须更换。

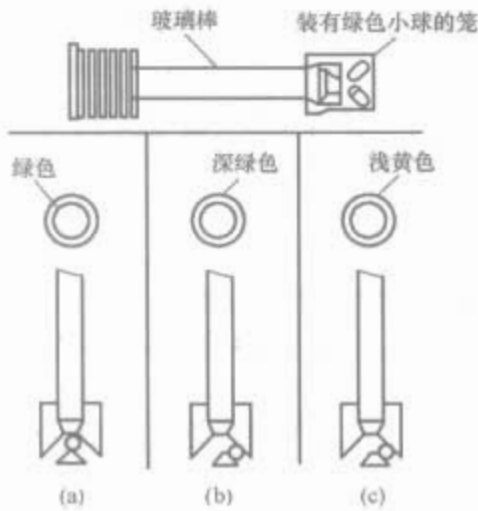


图 1.2-17 内装式密度计工作示意图

图 1.2-18 所示为免维护蓄电池的结构。

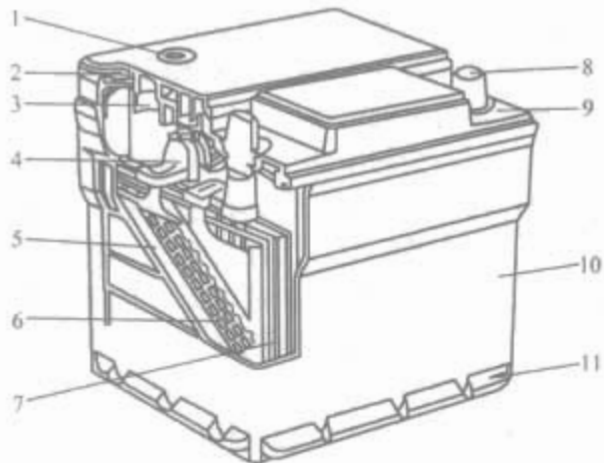


图 1.2-18 免维护蓄电池结构

1—内装小型密度计；2—壳内起消除火焰作用的排烟孔；3—液/气隔板；4—中心极板连接夹板和单体电池连接器；5—高密度活性物质；6—铅钙栅架上锻制的小窗；7—密封极板的隔板封皮；8—冷锻制成的极柱；9—模压代号；10—聚丙烯壳体；11—用于安装的下滑面

1.11.2 免维护蓄电池的优缺点

免维护蓄电池由于在极板材料和结构上做了很大改进，因而与普通蓄电池相比有如下一些优点：

(1) 使用中不需加注蒸馏水或很少加注蒸馏水。免维护蓄电池由于采用了低锑多元合金或铅钙合金作为栅架材料，其耐过充电能力增强，从而使充电末期水的电解量大大减少。例如，普通蓄电池行车 1000km 耗水约 16~32g，而免维护蓄电池耗水仅 1.6~3.2g。另外，免维护蓄电池由于采用袋式隔板和新型通气孔，不仅使储液量增加，还可抑制通过通气孔蒸发的水量，也使耗水量减少。所以，免维护蓄电池在使用中无需加注蒸馏水。

(2) 自放电少，容量保持时间长。免维护蓄电池可以在较长时间（一般为 2 年以上）湿式储存。

(3) 使用寿命长。免维护蓄电池的使用寿命一般都在 4 年左右，为普通蓄电池使用寿命的 2~3 倍。

(4) 接线极柱腐蚀小。免维护蓄电池由于设计有新型安全的通气装置，不但能保存单体电池中的酸气，并能预防火花或火焰引起的爆炸，还能保持其顶部干燥，因而减少了接线极柱的腐蚀。

(5) 内阻小、起动性能好。免维护蓄电池由于单体电池间采用穿壁式连接，减小了蓄电池内阻，可使连接条功率损失减少 80%，放电电压提高 0.15~0.4V，因此，比普通蓄电池具有较好的起动性能。

免维护蓄电池的主要缺点是极板制造工艺复杂，价格高。

1.12 胶体电解质蓄电池

胶体电解质蓄电池，简称胶质蓄电池。其内部结构与普通蓄电池完全相同，区别在于其电解质不是液体，而是采用纯净的硅酸钠与一定相对密度的硫酸溶液混合后所形成的软而透明的胶状体。这种蓄电池与普通蓄电池相比有如下优缺点：

(1) 由于电解质呈凝胶状，不会流动、无溅出，因此，维护、使用、保管和运输极为方便。

(2) 使用中只需添加少量的蒸馏水而无需测量和调整相对密度，并且胶状电解质本身失水量也少。

(3) 凝胶状的电解质会像保护套一样把极板紧紧裹起来，极板活性物质不易脱落，耐振动，因此使用寿命可适当延长。

(4) 由于放电产生的硫酸铅很难溶解到硫液胶状体中去，同时又阻止了溶于硫酸中的硫酸铅再次回到极板上形成再结晶，因而在一定程度上可防止极板的硫化。

(5) 胶体电解质的电阻比硫酸溶液大，因而使蓄电池内阻有所增加，大电流放电时容量有所降低。

(6) 胶体电解质与极板的接触不易均匀，使极板各部分形成电位差，自放电较大，且易造成极板腐蚀。

1.13 碱性蓄电池

碱性蓄电池仅需少量的维护且对使用要求不高，还能进行过度充、放电。其缺点在于它的体积过大、效能低，价格比酸性蓄电池贵。当把使用寿命和维护费用考虑进去时，那么最初的支出还是很值得的，公共汽车、大客车和大货车已开始使用碱性蓄电池。

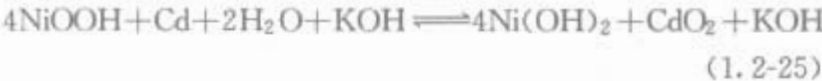
汽车上普遍使用的碱性蓄电池是镍镉型，镍镉型碱性蓄电池的主要组成部分如下：正极板为镍的水合物 (NiOOH)、负极板为镉 (Cd)、电解液是氢氧化钾 (KOH)

和水 (H₂O)。

隔板材料为橡胶或塑料。外壳用优质钢板压制、焊接镀镍而成，或用 ABS 树脂制成。

在制造过程中，正极板用氢氧化亚镍粉、石墨粉和其他添加剂，包在穿孔的钢带中压制而成。极板再焊接成极板组。添加石墨粉，是为了增加极板的导电性。负极板由氧化镉和氧化铁粉及其他添加剂包在穿孔的钢带中压制而成，再焊接成极板组。添加氧化铁粉是为了提高氧化镉粉的扩散性，防止结块，增加极板的容量。电解液是相对密度为 1.1~1.27g/cm³ 的氢氧化钾溶液。

充电后，正极板活性物质为镍的水合物，负极板为金属镉。放电终了时正极板转化为氢氧化镍，负极板转化为二氧化镉。充、放电的化学反应方程式为



这里的 2H₂O 分解成氢气和氧气并释放出来，这从充电过程中产生的气体可以看出。在反应过程中，电解液只作为电流的导体，不参加化学反应，故其浓度不变，或变化甚微。碱性蓄电池不会出现过充电问题，因为一旦二氧化镉全部转化为镉，反应将不再进行。

镍镉蓄电池的单格满充电压为 1.2V，组成 6V 蓄电池需要 5 个单格。组成 12V 蓄电池，需要 10 个单格。

为了降低碱性蓄电池的电阻，采用大面积的极板组，并用烧结的办法制造多孔骨架，而后填入活性物质。

图 1.2-19 所示为一个简单的镍镉型碱性蓄电池单体结构。

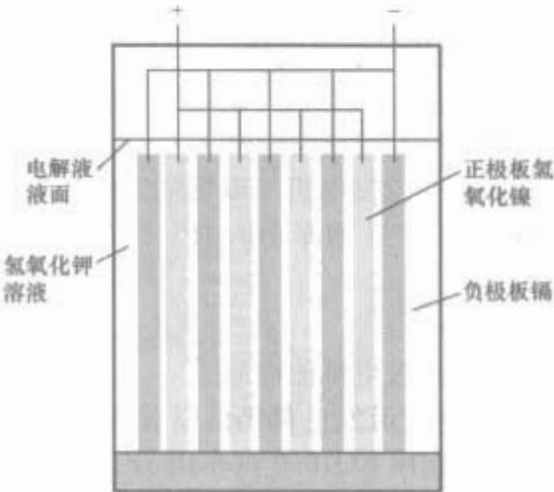


图 1.2-19 镍镉型碱性蓄电池单格结构

1.14 新型蓄电池

20 世纪 70 年代以来，由于受到汽车排放污染和能源危机的冲击，世界各国都在不断探索和研制更理想的汽车用电池，用电池代替发动机作为汽车的动力源，于是电动汽车应运而生。

目前，汽车用铅蓄电池比能量仅为 40~50W·h/kg，动力电池要求其比能量大于 140W·h/kg，充电循环次数在 800 次以上，在汽车上一次充电的续驶里程应达到 240km。

以下是很有发展前途的动力电池。

1.14.1 钠硫电池

图 1.2-20 所示为钠硫蓄电池的模型在钠硫电池中，阴极的反应物质是熔融的钠，阳极的反应物质是带有一定导电物质的硫，电解质为 β-氧化铝矾土陶瓷管，化学式为 NaAl₁₁O₁₇。它既是绝缘体，又能自由传导钠离子。其作用原理是，当外电路闭合时，阴极不断产生钠离子并放出电

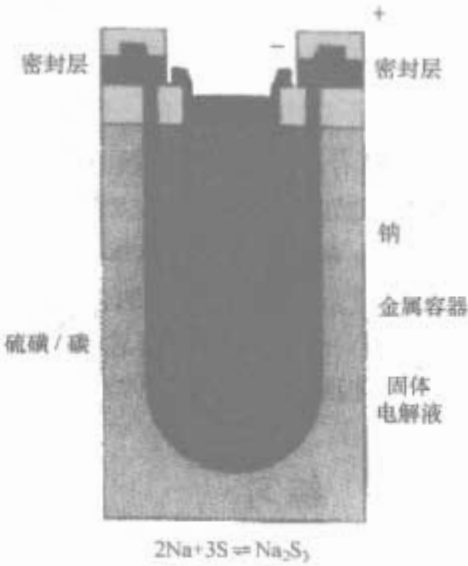


图 1.2-20 钠硫蓄电池

子，即



电子通过外电路移向阳极，而钠离子 Na⁺ 通过 β-氧化铝电解质和阳极的反应物质硫起作用，生成钠的硫化物。



式中：Na₂S_x 可以是 Na₂S₂、Na₂S₄、Na₂S₅ 等。

上述反应不断进行，电路中便获得了电流。这种电池，理论比能量高达 640W·h/kg，效率可达 100%，即可使用与充电量相同的电量。充电时间短，无污染，原材料丰富，各国都竞相研制这种电池。

钠硫电池的缺点是硫化钠的工作温度高，达 250~300℃，使用尚有困难。

1.14.2 燃料电池

燃料电池由燃料、氧化剂、电极、电解质等组成。燃料有氢、煤气、天然气等。氧化剂有氧气、空气、氯气等。电极是多孔烧结镍、多孔银等。电解质为 KOH 溶液。燃料电池是利用燃料的氧化反应，直接将化学能转变为电能的。与普通蓄电池不同，只要燃烧不断，就会一直产生电流。

燃料电池种类很多，有氢—氧、碳化氢、联氨等类。现以氢—氧燃料电池为例，做简单介绍。

氢—氧燃料电池以氢气为燃料，以氧气为氧化剂，其结构如图 1.2-21 所示。

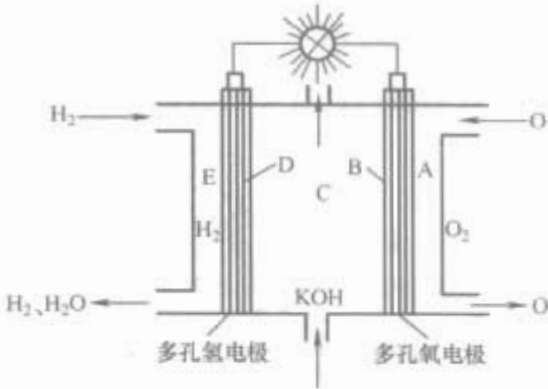


图 1.2-21 氢—氧燃料电池结构示意图

A—氧气腔；B—正极（多孔氧电极）；
C—饱含电解液的石棉层；
D—负极（多孔氢电极）；E—氢气腔

A 是氧气腔，氧气由高压氧气筒供给，工作压力为 666~1333Pa。E 是氢气腔，氢气由高压氢气筒供给。正极 B 是多孔性的氧电极，用钴和铝作催化剂。负极 D 是多孔氢电极，用钯作催化剂。C 中充满石棉，石棉中饱含电解液，电解液

是30%的KOH溶液,由液泵使之循环。其化学反应为



电解液中KOH不断电离和化合,形成相对平衡状态。

放电时,在负极D(氢电极)处, H^+ 与 OH^- 化合生成水,并放出电子。电子通过外电路送到正极。



在正极B(氧电极)处,氧气与水 and 外电路流来的电子起作用,生成 OH^- ,进入电解液。



总反应为



在反应过程中,氢和氧不断地消耗,生成水。所以只要不断供给氢和氧,反应就一直进行,不断地产生电能,向外供电。

燃料电池,比能量已达 $200\text{W} \cdot \text{h}/\text{kg}$,是铅蓄电池的4~7倍,且不需充电。只要不断供应燃料,就可继续使用,因此适合作为汽车的动力源。但它需贵金属作催化剂,成本高。燃料的储存和运输都有一定困难,有待进一步解决。

1.14.3 锌—空气电池

锌—空气电池比能量可达 $150 \sim 400\text{W} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 。正极板由金属网集电器、活性层等组成,是一个薄空气电极。负极是纯锌,电解质为氢氧化钾水溶液。其工作电压为1.0~1.2V。

放电时正极板上的反应为



理论上空气的消耗量大约为 $1\text{m}^3/(\text{kA} \cdot \text{h})$ 。

负极板锌的氧化过程可概括为



充电时,按上述过程反向进行。

蓄电池的总反应为



锌—空气电池具有放电电压稳定,没有污染等优点,但工作时要消耗一定能量,用于清除空气中的二氧化碳、滤清、通风,还有限制放电电流等缺点,尚需进一步研究解决。

2 交流发电机及其调节器

由于交流发电机与直流发电机相比具有许多优点,从

20世纪60年代开始,交流发电机逐步取代直流发电机。目前进口车、国产车已全部装用交流发电机了。

2.1 交流发电机

2.1.1 分类

(1) 按总体结构分:

1) 普通交流发电机(使用时需配装电压调节器)。如东风EQ1090(EQ140)型载货汽车用JF132型交流发电机、解放CA1091型载货汽车用JF1522A型交流发电机等。

2) 整体式交流发电机(发电机内装电子调节器)。如一汽奥迪、上海桑塔纳等轿车用JFZ1813Z型交流发电机。

3) 带泵交流发电机(带有真空制动助力泵的发电机)。如JFB1712、JFZB292型交流发电机。

4) 无刷交流发电机(无电刷、集电环结构的发电机)。如福建仙游电机厂生产的JFW14X型交流发电机。

5) 永磁交流发电机(转子磁极采用永磁材料制成的发电机)。

(2) 按整流器结构分:

1) 六管交流发电机(整流器由六只硅二极管组成)。如JF1522A、JF152D、JF132型发电机。

2) 八管交流发电机。如天津夏利TJ7100、TJ7100U微型轿车用的JFZ1542型发电机。

3) 九管交流发电机。北京BJ1022轻型载重车用的JFZ141型发电机。

4) 十一管交流发电机。如桑塔纳轿车用的JFZ1913Z型发电机。

(3) 按磁场绕组搭铁形式分:

1) 内搭铁型交流发电机(磁场绕组的一端与发电机壳体相连)。如JF132型交流发电机。

2) 外搭铁型交流发电机(磁场绕组的一端经调节器后搭铁)。如解放CA1091型车用的JF1522A、JF152D型交流发电机。

2.1.2 构造与型号

2.1.2.1 有刷交流发电机的构造

现在汽车上的交流发电机仍然以有刷交流发电机为主。图1.2-22所示为东风EQ1090汽车用JF1512型交流发电机构造图。桑塔纳系列轿车装用的发电机型号为JFZ1813Z,它是带调节器的整体式交流发电机,主要由转子总成、定子总成、整流器、风扇、元件板等组成,其结构如图1.2-23所示。

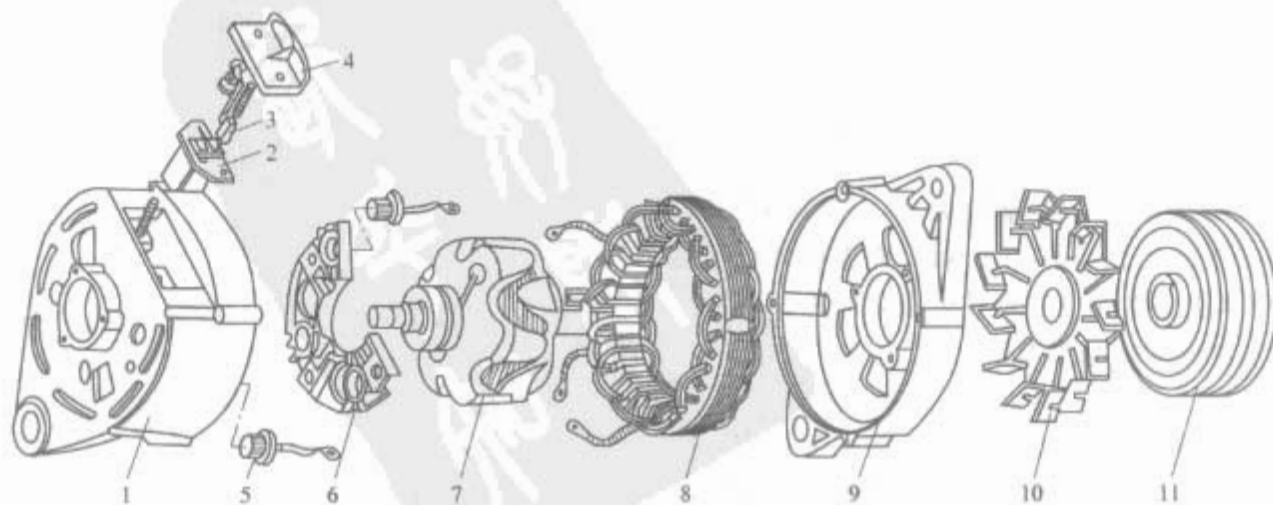


图 1.2-22 国产 JF1512 型交流发电机结构图

1—后端盖;2—刷架;3—电刷;4—电刷弹簧压盖;5—硅二极管;6—散热板;
7—转子;8—定子总成;9—前端盖;10—风扇;11—带轮

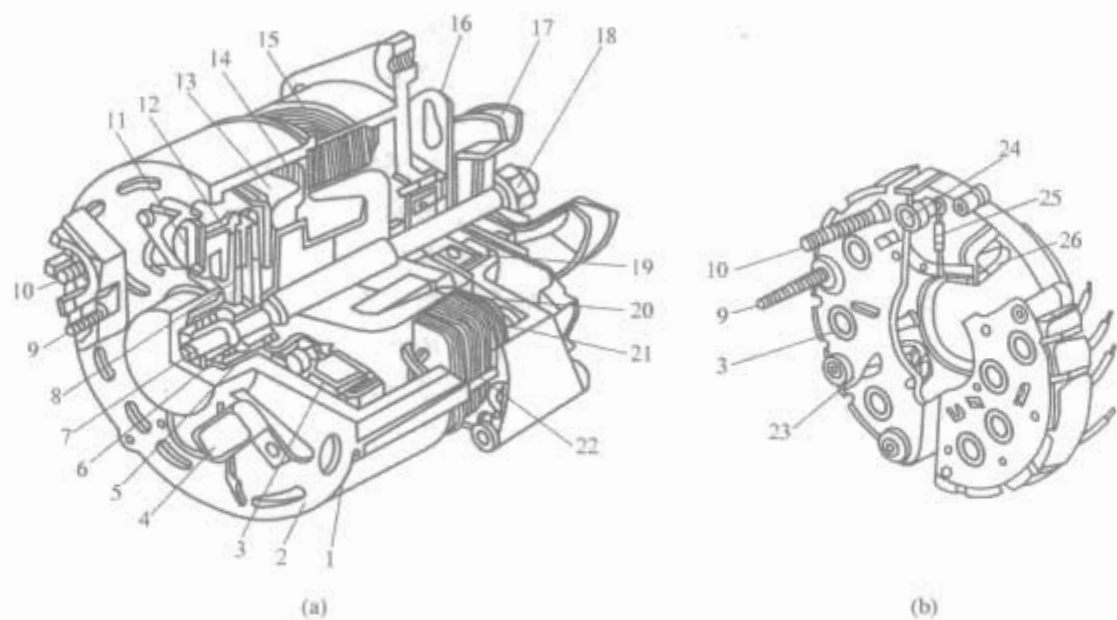


图 1.2-23 JFZ1813Z 型交流发电机结构

(a) 发电机总成；(b) 整流器总成

1—连接螺栓；2—反端盖；3—整流板；4—防干扰电容器；5—滑环；6、19—轴承；7—转子轴；8—电刷；9—“D⁺”端子；10—“B⁺”端子；11—IC 调节器；12—电刷架；13—磁极；14—定子绕组；15—定子铁心；16—风扇叶轮；17—V 带轮；18—紧固螺母；20—励磁绕组；21—前端盖；22—定子槽楔子；23—电容器连接插片；24—输出整流二极管；25—励磁二极管；26—电刷架压紧弹簧

JFZ1813Z 型交流发电机各部件结构如下：

(1) 定子。定子的功用是产生交流电，其结构如图 1.2-24 所示，由定子铁心和定子绕组组成。定子铁心由内圆带槽的环状硅钢片叠成，定子绕组为三相对称绕组，安装在定子铁心的槽内。三相绕组的连接方法采用星形连接，绕组引线端子共有 4 个，三相绕组各引一个，中性点引出一个。

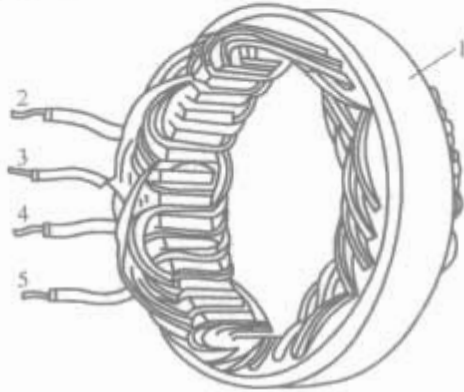


图 1.2-24 发电机定子的结构

1—定子铁心；2、3、4、5—定子绕组引线端

(2) 转子。转子的功用是产生磁场，转子主要由转子铁心、励磁绕组（又称磁场绕组）、爪极和滑环组成，如图 1.2-25 所示。爪极有两块，每块上都有六个鸟嘴形磁极，两块爪极安装在转子轴上，爪极间的空腔内装有转子铁心和励磁绕组。励磁绕组绕在铁心上，铁心压装在两块爪极之间的转子轴上。滑环由彼此绝缘的两个铜环组成，压装在转子轴的一端并与转子轴绝缘。励磁绕组的两端分别从内侧爪极上的两个小孔中引出，其中一端焊接在滑环的内侧铜环上，另一端则穿过内侧铜环上的小孔并焊接在外侧铜环上，两个铜环分别与发电机的两个电刷接触。

(3) 整流器。整流器的功用是将三相绕组产生的交流电变为直流电。由于整流器的主要元件是硅二极管，所以又将其称为硅整流器。交流发电机整流二极管有正极管和负极管之分，引出电极为二极管正极的称为正极管，引出线为二极管负极的称为负极管。桑塔纳系列轿车发电机输出端子标记为“B⁺”（有的发电机标为“+”、“电枢”、“B”、“A”或“火线”）为发电机正极。发电机整流器总成外形如图 1.2-23

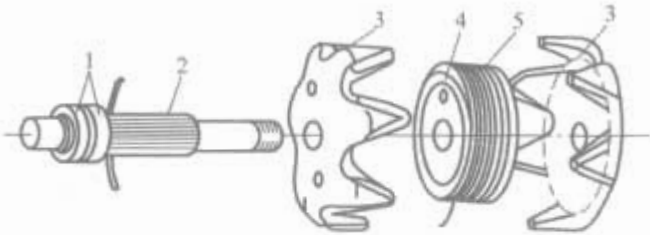


图 1.2-25 发电机转子的结构

1—滑环；2—转子轴；3—爪极；4—转子铁心；5—励磁绕组

(b) 所示。该整流器设有 11 只二极管，其中包括三只正极管、三只负极管、三只励磁二极管和两只中性点二极管。整流器上各元器件的安装位置如图 1.2-26 所示。

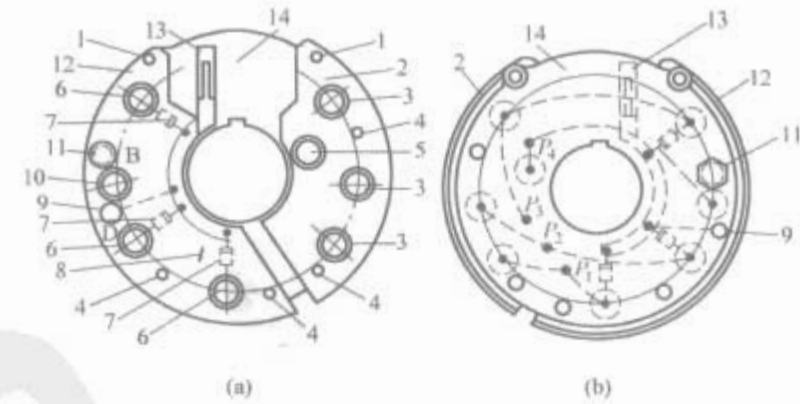


图 1.2-26 JFZ1813Z 型发电机整流元件的安装位置

(a) 从后端盖一侧看；(b) 从前端盖一侧看

1—IC 调节器安装孔（2 个）；2—负整流板；3—负极管；4—整流器总成安装孔（4 个）；5—中性点二极管（负极管）；6—正极管；7—励磁二极管；8—防干扰电容器连接插片；9—“D⁺”端子；10—中性点二极管（正极管）；11—端子；12—正整流板；13—电刷架压紧弹片；14—硬树脂绝缘胶板

(4) 电压调节器。桑塔纳系列轿车发电机配用的调节器为集成电路调节器（简称 IC 调节器），具有结构紧凑、工作可靠、体积小、质量轻等优点。IC 调节器与电刷组件制成一个整体结构，并采用外装结构，当电刷磨损或调节器损坏需要更换时，拆下总成部件的两个固定螺钉，即可取下总成，检修十分方便。IC 调节器与电刷组件总成如图 1.2-27 所示。两只电刷的引线分别用

导电片与IC调节器电路的正极(D⁺)和磁场(F)连接,主视图中右边一个安装孔用导电片与调节器电路的负极(D⁻)连接。当调节器发生故障时只能更换。整体式交流发电机的内部电路如图1.2-28所示。发电机与外电路有三个连接端子,其中“B⁺”为发电机输出端子,“D⁺”为励磁绕组接线端子,“D⁻”为发电机搭铁端子。

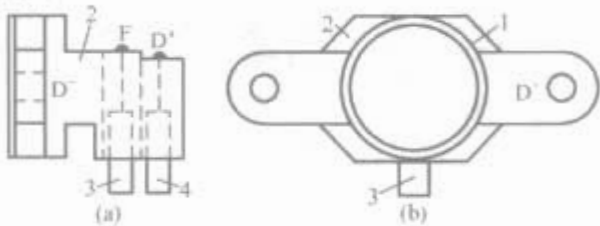


图 1.2-27 IC 调节器与电刷组件
(a) 右视图; (b) 主视图

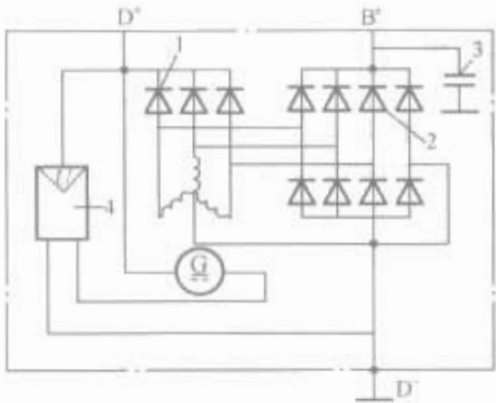


图 1.2-28 整体式交流发电机电路图
1—励磁二极管; 2—输出整流二极管;
3—防干扰电容; 4—IC调节器; G—励磁绕组

(5) 端盖。交流发电机的前、后端盖均用铝合金铸造而成,具有质量轻、散热性好、不导磁等优点。在后端盖上安装有电刷组件与调节器总成。电刷组件由电刷、电刷架和电刷弹簧组成。电刷安装在电刷架的孔内,借弹簧张力使电刷与滑环保持良好接触。每只电刷都有一根引线,该引线直接引到IC调节器内部,从而将励磁绕组与调节器工作电路连接起来。

在发电机前端盖前安装有风扇和V形带轮,由发动机通过V形带来驱动发电机带轮和转子转动。发电机的通风散热依靠风扇来实现。在前、后端盖上制有通风口,当风扇与带轮一起转动时,空气便从进风口流入,经发电机内部再从出风口流出,由此便将发电机内部热量带出,达到散热目的。



图 1.2-30 国产 JFW14X 型爪极式无刷交流发电机外形及其分解图
1—外形; 2—后轴承; 3—防护罩; 4—元件板和硅二极管组; 5—励磁绕组支架及后轴承支架; 6—定子总成; 7—磁轭;
8—励磁绕组接头; 9—励磁绕组; 10—爪极及转子轴总成; 11—前端盖; 12—风扇叶; 13—传动带轮

2.1.2.2 无刷交流发电机的构造

无刷发电机提高了发电机的工作可靠性和使用寿命,维修保养方便。

(1) 感应子式无刷交流发电机。这种发电机的定子铁心内圆上开有4个大槽和12个小槽,4个大槽将12个小槽均分为4部分,每部分为3个小槽。在4个大槽中,绕放4个励磁绕组,在小槽中绕放电枢绕组,如图1.2-29所示。转子由凸齿状冲片铆成。

当励磁绕组中有直流电流通过时,其周围产生磁场,转子被磁化。由于转子凸齿在旋转时和定子铁心相对位置不断变化,使得定子上的电枢绕组产生大小和方向不断变化的感应电动势。将各电枢绕组产生的电动势按相加原则串联起来,再经整流器整流后便得到直流电。

由于发电机工作时在电枢绕组中产生的是单相交流电,所以其整流器是由两个硅二极管组成的单相全波整流器。

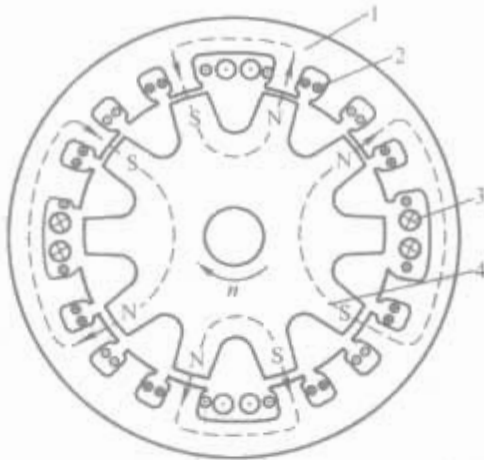


图 1.2-29 感应子式交流发电机
1—定子; 2—励磁绕组; 3—电枢绕组; 4—转子

(2) 爪极式无刷交流发电机。这种交流发电机的结构与普通交流发电机大致相同。图1.2-30所示为国产JFW14X型无刷交流发电机的外形图和分解图,其励磁绕组是静止不动的,因此,励磁绕组的两端引出线可以直接引出,省去了电刷和集电环,爪极在励磁绕组的外围旋转。

爪极式无刷交流发电机的结构原理和磁路如图1.2-31所示。其特点是励磁绕组7通过一个磁轭托架2固定在后端盖3上。两个爪极中只有一个爪极直接固定在发电机转子轴

上, 另一个爪极 4 则用非导磁连接环 6 固定在前述爪极上。当励磁绕组中有直流电通过时, 其磁路是: 左边的爪极磁极 N→主气隙→定子铁心 5→主气隙→右边的爪极磁极 S→转子磁轭 8→附加气隙→托架 2→附加气隙。

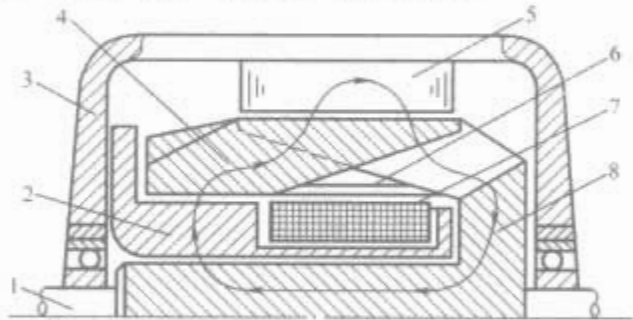


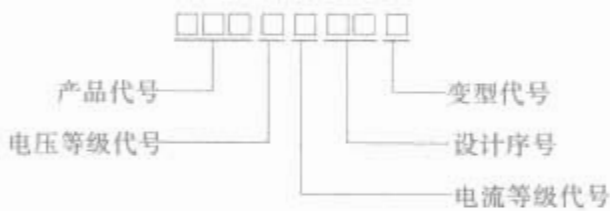
图 1.2-31 爪极式无刷交流发电机结构原理及磁路
1—转子; 2—磁轭托架; 3—端盖; 4—爪极; 5—定子铁心;
6—非导磁连接环; 7—励磁绕组; 8—转子磁轭

转子旋转时, 爪极形成的 N 极和 S 极磁力线在定子绕组内交替通过, 定子槽中的三相绕组就感应出交变电动势, 在回路中形成三相交流电, 经整流后变为直流电。

这种交流发电机两个爪极之间的连接制造工艺较困难。此外, 由于磁路中增加了两个附加气隙, 故在输出相同功率的情况下, 其励磁绕组的励磁电流必须增大。

2.1.2.3 国产交流发电机型号

根据中华人民共和国汽车行业标准 QC/T 73—1993《汽车电气设备产品型号编制方法》的规定, 国产硅整流交流发电机的型号组成如下:



(1) 产品代号。JF 表示普通交流发电机、JFZ 表示整体式交流发电机、JFB 表示带泵式交流发电机、JFW 表示无电刷式交流发电机。

(2) 电压等级代号和电流等级代号。分别用 1 位数字表示, 含义见表 1.2-7 和表 1.2-8。

表 1.2-7 电压等级代号						
电压等级代号	1	2	3	4	5	6
电压等级 (V)	12	24	—	—	—	6

表 1.2-8 电流等级代号									
电流等级(A)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
产品									
交流发电机									
整体式交流发电机		20	30	40	50	60	70	80	≥90
带泵式交流发电机	<20	~29	~39	~49	~59	~69	~79	~89	
无电刷式交流发电机									

(3) 设计序号。按产品设计先后顺序, 由 1~2 位阿拉伯数字组成。

(4) 变型代号。以调整臂位置作为变型代号。从驱动端看, 调整臂在中间的不加标记, 在右边的用 Y 表示, 在左边的用 Z 表示。

例如, EQ1090 车用的 JF1512 型为普通交流发电机, 电压等级为 12V, 额定电流 $I \geq 50 \sim 59A$, 第 12 次设计; 桑塔纳车用的 JFZ1813Z 型为整体式交流发电机, 电压等级为

12V, 额定电流 $I \geq 80A$, 第 13 次设计, 调整臂在左边。

2.1.3 工作原理

2.1.3.1 发电原理

发电机的工作原理是电磁感应。交流发电机就是把通电线圈所产生的磁场在发电机中旋转, 使其磁力线切割定子线圈, 在线圈内产生交变电动势的。图 1.2-32 所示为交流发电机的工作原理图。发电机三相定子绕组按一定规律分布在发电机的定子槽中, 彼此相差 120° 电角度。转子磁场呈鸟嘴形, 其磁场的分布呈近似正弦规律, 所产生的交流电动势也近似正弦波形。

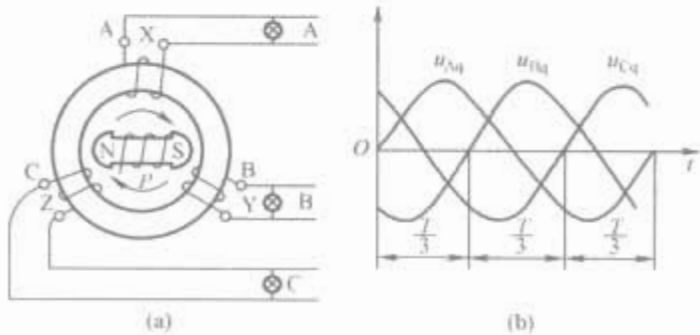


图 1.2-32 三相交流发电机工作原理
(a) 三相交流发电机; (b) 输出波形

当转子旋转时, 在三相绕组中产生频率相同, 幅值相等相位互差 120° 电角度的正弦电动势 e_A 、 e_B 和 e_C , 其波形如图 1.2-33 (b) 所示。三相绕组中电动势的瞬时值方程式为

$$e_A = E_{max} \sin \omega t = \sqrt{2} E_\Phi \sin \omega t \tag{1.2-35}$$

$$e_B = E_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2} E_\Phi \sin(\omega t - 120^\circ) \tag{1.2-36}$$

$$e_C = E_{max} \sin(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2} E_\Phi \sin(\omega t - 240^\circ) \tag{1.2-37}$$

式中: E_{max} 为每相电动势的最大值; E_Φ 为每相电动势的有效值; ω 为电角速度, $\omega = 2\pi f$ 。

发电机每相绕组中所产生的电动势的有效值为

$$E_\Phi = 4.44 K f N \Phi \tag{1.2-38}$$

其中

$$f = pn/60$$

式中: K 为绕组系数 (交流发电机采用整距集中绕组时 $K=1$); f 为感应电动势的频率, Hz; p 为磁极对数; n 为转速, r/min; N 为每相绕组的匝数; Φ 为每极磁通, Wb。

交流发电机定子绕组内感应电动势的大小与每相绕组串联的匝数以及感应电动势的频率成正比。

2.1.3.2 整流原理

在定子绕组中, 感应出的交流电经硅二极管组成的整流器整流变为直流电。

三相桥式全波整流的原理如图 1.2-33 所示。

同时导通的管子有两个, 正负管子各一个。导通的两个二极管, 将发电机整流后的直流电压加在负载 R_L 两端。

经整流后的直流电压 U 就是硅整流发电机的输出电压, 数值为三相交流电压的 1.35 倍。

$$U = 1.35 U_L = 2.34 U_\Phi \tag{1.2-39}$$

式中: U_L 为线电压的有效值; U_Φ 为相电压的有效值。

$$U_L = \sqrt{3} U_\Phi \tag{1.2-40}$$

中性点接线柱 “N” 的直流电压 U_N 为三相半波整流电压值, 也就是直流输出电压值的一半。

$$U_N = U/2 \tag{1.2-41}$$

式中: U_N 为中性点电压。

有些发电机用导线将 U_N 引出, 成为带有中性点抽头的

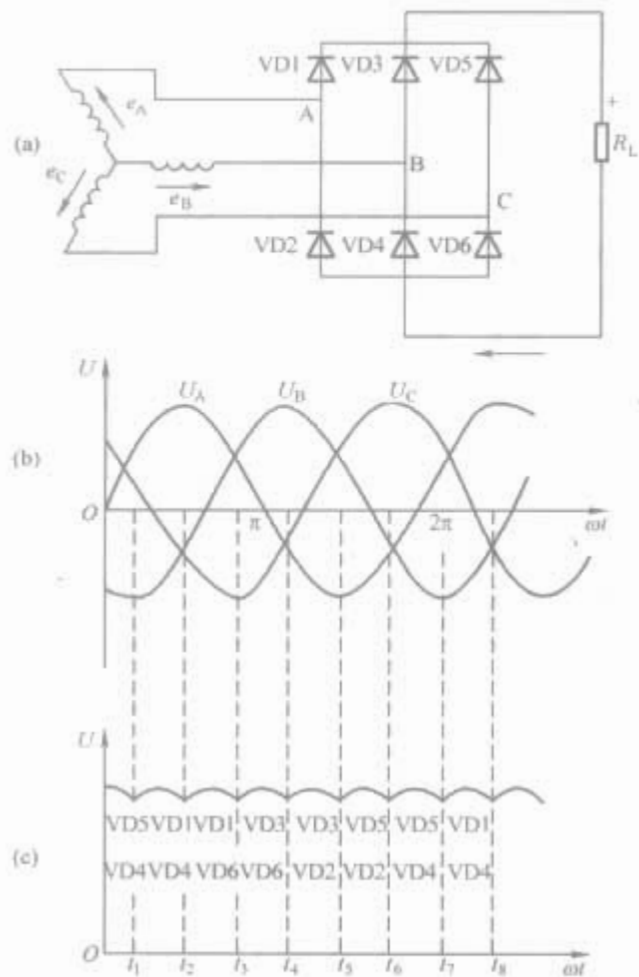


图 1.2-33 三相桥式整流电路及其电压波形
(a) 电路; (b) 三相交流电动势;
(c) 整流后的直流输出电压

发电机, 接线柱标为“N”, 如图 1.2-34 所示。中性点电压一般用来控制各种用途的继电器, 如磁场继电器、充电继电器、指示灯继电器等。

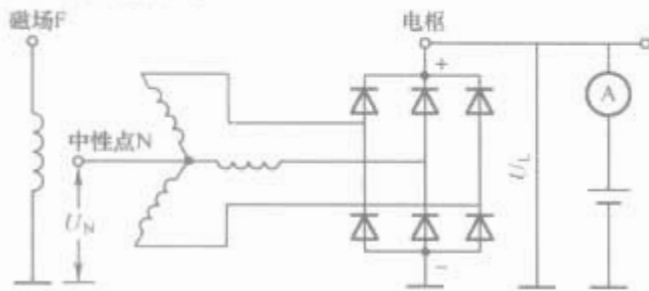


图 1.2-34 带中性点接线柱的交流发电机

2.1.4 特性

汽车用硅整流交流发电机的工作特点是传动比大, 转速变化范围大。一般汽油发动机转速变化范围为 1:8, 柴油机为 1:5。因此, 硅整流器交流发电机的特性, 必须以转速的变化为基础。

交流发电机的主要特性有输出特性、空载特性和外特性, 其中以输出特性最为重要。

2.1.4.1 输出特性

交流发电机的输出特性, 又叫负载特性或输出电流特性, 是指发电机输出电压一定时 (对 12V 电系, 规定为 14V; 对于 24V 电系, 规定为 28V), 发电机的输出电流与转速之间的关系, 即输出电压 U 为常数时的 $I-n$ 曲线。

交流发电机的输出特性曲线如图 1.2-35 所示。

(1) 当发电机转速很低时, 发电机端电压低于额定电压, 发电机不能向外供电; 当转速到达空载转速 n_1 时, 电压达到额定值, 此时, 发电机才有能力在额定电压下向外供电。 n_1 值是选择发电机与发动机速比的主要依据。一般地, n_1 应等于或略高于发动机怠速转速。

(2) 转速超过 n_1 时, 发电机的输出电流 I 随着转速的升

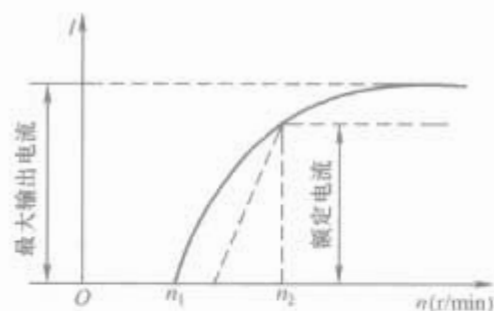


图 1.2-35 交流发电机的输出特性

高而升高, 随着负载电阻 R 的减小而升高。转速等于 n_2 时, 发电机输出额定功率。额定功率为额定电压与额定电流之积。 n_2 又叫满载转速。通常, 所选 n_2 应低于发动机最高转速, 等于或略高于发动机常用转速。空载转速和满载转速, 是交流发电机的主要性能指标, 在产品说明书中均有规定。

(3) 发电机转速达到一定值时, 其输出电流不再随转速的升高而升高, 也不再随负载电阻 R 的减小而升高。这时的电流值称为发电机的最大输出电流或限流值。发电机具有自动限制电流的自我保护能力。发电机的最大输出电流约为额定电流的 1.5 倍。

2.1.4.2 空载特性

发电机空载时, 发电机端电压与转速的关系称空载特性, 即 $I=0$ 时, $U=f(n)$ 的函数关系, 如图 1.2-36 所示。

随着转速的升高, 端电压上升较快, 由他励转入自励时, 即能向蓄电池进行补充充电。空载特性是判断硅整流发电机性能是否良好的重要依据。

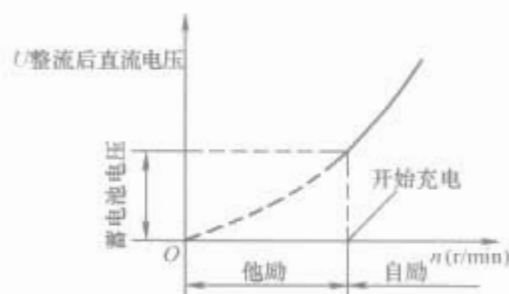


图 1.2-36 空载特性

2.1.4.3 外特性

转速一定时, 发电机端电压与输出电流的关系叫外特性, 即 n 为常数时, $U=f(I)$ 的函数关系。经不同的恒定转速试验后, 可得一组相似的外特性曲线族, 如图 1.2-37 所示。

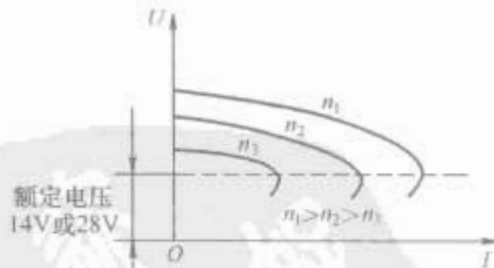


图 1.2-37 外特性

发电机转速越高, 端电压越高, 输出电流也越大。当保持任一转速时, 端电压均随输出电流的增大而下降。由于端电压受转速和负载变化的影响, 交流发电机必须配用电压调节器, 才能保持电压的恒定。否则, 当发电机高速运转时, 若突然失去负载, 其电压会突然升高, 可能击穿电子元件和烧毁用电设备。

2.2 调节器

2.2.1 调节器的功用与原理

交流发电机的感应电动势 E_ϕ 与其转速 n 和每极磁通 Φ

的乘积成正比，而交流发电机的输出电压 U 又正比于 E_{ϕ} 。汽车在行驶中，发动机转速经常变化，发电机的转速也随之变化，致使发电机的输出电压时高时低。这与用电设备和蓄电池要求电压恒定相矛盾。为此，车用交流发电机均配备电压调节器，以便在发电机转速变化范围内自动调节发电机输出电压，使其保持稳定，以防烧坏用电设备和蓄电池过充电。这就是电压调节器的功用。

$$U \propto E_{\phi} = C_e \Phi n \tag{1.2-42}$$

式中： C_e 为交流发电机的结构常数。

故在交流发电机转速变化时，如果相应地、自动地改变磁极磁通，就可保持输出电压恒定。磁通的大小随发电机磁场电流的大小而变化，因此当发电机转速变化时，相应地调节磁场电流的大小，即可保持输出电压的稳定。发电机电压调节器就是根据这一原理工作的。

2.2.2 调节器的分类

汽车所用的交流发电机调节器种类繁多，形式各异。依照其结构特点和工作原理，大致可分为两大类：电磁振动式调节器（也称触点式调节器）和电子调节器。

2.2.2.1 电磁振动式调节器

电磁振动式调节器是通过一对或两对触点反复开闭来改变磁场电路的电阻，以调节磁场电流的。

(1) 按触点的对数分：

- 1) 单级式。只有一对触点，如 FT111、FT211 型调节器。
- 2) 双级式。有两对触点，如 FT61、FT70 型调节器。

(2) 按组成数分：

- 1) 单联式。只有一组电压调节器，如 FT61、FT70 型调节器。
- 2) 双联式。除电压调节器外，另有一组磁场继电器或充电指示继电器，如 FT61A 型调节器。

2.2.2.2 电子调节器

电子调节器是利用晶体三极管的开关特性，使磁场电路接通或断开来调节磁场电流的。

(1) 按结构形式分：

- 1) 晶体管式。由分立元件组成的调节器，如解放 CA1091 型载货汽车用的 JFT106 型电子调节器。
- 2) 集成电路调节器。由集成电路（IC）组成的调节器，如北京切诺基 BJ2021、奥迪 100 和上海桑塔纳等轿车调节器。

(2) 按安装方式分：

- 1) 外装式。与交流发电机分开安装的调节器，如 JFT106 调节器。
- 2) 内装式。安装在交流发电机上的调节器，一般为集成电路调节器，如北京切诺基、上海桑塔纳等车的调节器等。

(3) 按搭铁形式分：

- 1) 内搭铁式。与内搭铁型交流发电机配套使用的电子调节器，如 JFT126A 型调节器。
- 2) 外搭铁式。与外搭铁型交流发电机配套使用的电子调节器，如 JFT106 型调节器。

(4) 按功能多少分：

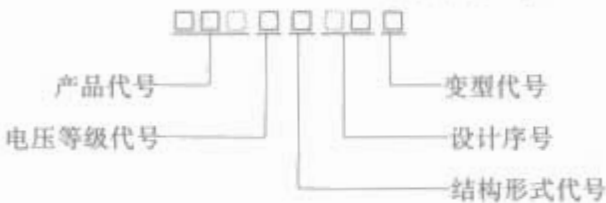
- 1) 单功能型。仅有调压功能，如 JFT106 型调节器。
- 2) 多功能型。除电压调节功能外，还有其他功能，如充电指示功能、过压控制功能等。

随着汽车电子技术的迅速发展，现代汽车已广泛使用交流发电机和集成电路调节器装在一起的整体式交流发电机。有的还安装了微处理器，利用微处理器控制交流发电机输出

电压。

2.2.3 电压调节器的型号

QC/T73—93《汽车电气设备产品型号编制方法》规定，发电机调节器的产品型号编制方法如下：



- (1) 产品代号。交流发电机调节器的产品代号有“FT”、“DFT”两种，分别表示发电机调节器和电子发电机调节器。
- (2) 电压等级代号。与交流发电机相同。
- (3) 结构形式代号。用一位阿拉伯数字表示，见表1.2-9。

表 1.2-9 发电机调节器的结构形式代号

结构形式代号	1	2	3	4	5
发电机调节器	串联	并联	三联	—	—
电子调节器	—	—	—	晶体管式	集成电路式

(4) 设计序号。按产品设计先后次序，以 1~2 位阿拉伯数字表示。

(5) 变型代号。以汉语拼音大写字母 A、B、C…顺序表示，但不能用 I 和 O。

例如，FT126C 表示 12V 的双联电磁振动式调节器，第六次设计，第三次变型；FTD152 表示 12V 集成电路调节器，第二次设计。

2.2.4 电磁振动式调节器

2.2.4.1 基本结构和工作原理

电磁振动式调节器的基本结构简图如图 1.2-38 所示，其工作原理如图 1.2-39 所示。

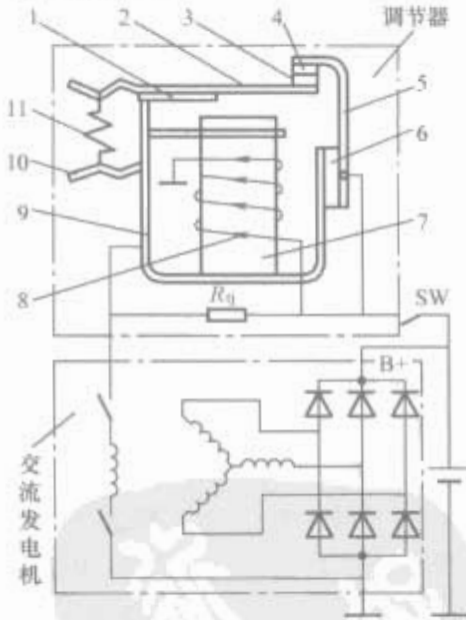


图 1.2-38 电磁振动式调节器结构
1—铰链；2—衔铁；3、4—触点；5、10—支架；
6—绝缘条；7—铁心；8—磁化线圈；9—磁轭；
11—弹簧； R_0 —调节电阻

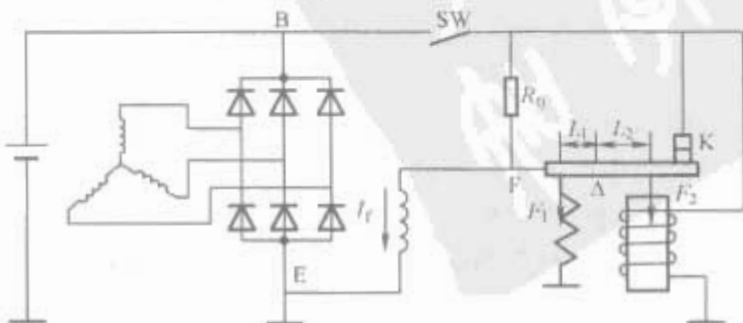


图 1.2-39 电磁振动式调节器原理图

当发电机未转动时,调节器触点在弹簧作用下保持闭合。当点火开关 SW 闭合时,从蓄电池流出的电流,一路经调节器触点 K 给发电机磁场绕组提供磁场电流,其磁场电路为:蓄电池正极→触点 K→磁场绕组→发电机搭铁→蓄电池负极。另外一路通过调节器的磁化线圈到调节器搭铁形成回路。尽管磁化线圈有电流流过,但电压较低,它所产生的电磁力矩还不能克服弹簧拉力的反力矩,故触点仍保持闭合。发电机转动后,产生的电动势随转速的升高而升高。当发电机转速较低,其输出电压低于蓄电池电压时,发电机磁场绕组和调节器磁化线圈仍由蓄电池供电,供电回路与发电机未转动时相同。

发电机转速升高,当其输出电压高于蓄电池电压时,发电机磁场绕组、调节器磁化线圈以及其他用电设备开始由发电机供电,即发电机开始自激发电。这时,发电机的激磁回路供电线路为:发电机正极(B+)→触点 K→磁场绕组→搭铁→发电机负极。而调节器的磁化线圈供电线路为:发电机正极(B+)→调节器磁化线圈→搭铁→发电机负极。

发电机转速升高,当其电压增高到某一数值 U_2 时,由于线圈的电磁力矩大于弹簧力矩而将衔铁吸下,触点分开。调节电阻 R_q 便串入磁场电路中,此时磁场激磁电路为:发电机正极→调节电阻→磁场绕组→发电机负极。由于磁场中串入了调节电阻,因而磁场电流减小,磁场减弱,使发电机电压下降。当电压降至某一数值 U_1 时,由于磁化线圈中电流减小,电磁力矩小于弹簧力矩,触点重新闭合,调节电阻又被短路,磁场电流和电压又上升,当升高至 U_2 时,触点又打开。在节压器工作时,触点快速开闭,周期振动,使发电机电压总在 U_1 、 U_2 间脉动,保持一平均值 U_0 ,如图 1.2-40 所示。

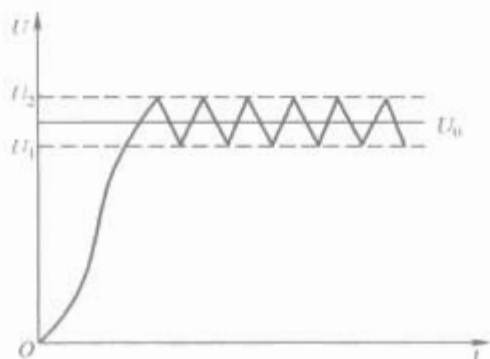


图 1.2-40 电压脉动曲线

电压平均值 U_0 为调节器控制下的发电机输出电压,称为调节器的调节电压。对于 12V 电系,该电压值为 13.5~14.8V。对于 24V 电系,为 27~29V。

2.2.4.2 具有灭弧系统的单级电磁振动式调节器

FT111 型调节器是具有灭弧系统的单级电磁振动式调节器,它可有效地克服普通单级电磁振动式调节器触点易产生火花迅速烧蚀的缺点,适用于任何 12V、300~500W 内搭铁国产交流发电机。其结构及线路如图 1.2-41 所示。

FT111 型调节器是在传统单级电磁振动式调节器的基础上,增加了一个由二极管 VD、扼流线圈 L_2 和电容 C 组成的 VD-LC 触点灭弧系统。其灭弧原理可用图 1.2-42 加以说明。

当发电机电压达到规定值时,磁化线圈 L_1 使触点打开,调节电阻 R_q 和加速电阻 R_{js} 串入,磁场电流急剧减小,结果在磁场绕组中产生了很高的自感电动势。其感应电流可通过二极管 VD、扼流线圈 L_2 构成回路,起到续流作用,保护了触点。另外,在触点两端通过 L_2 并联一电容器用来吸收自感电动势,也减小了触点的火花。

具有灭弧系统的单级电磁振动式调节器的优点是,只有

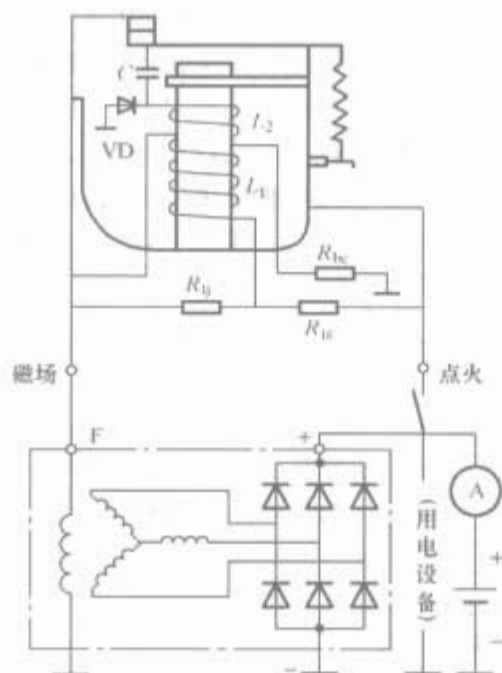


图 1.2-41 FT111 型单级电磁振动式调节器
 R_{js} —加速电阻; R_q —调节电阻; R_{bc} —补偿电阻; L_1 —磁化线圈; L_2 —扼流线圈;VD—二极管;C—电容

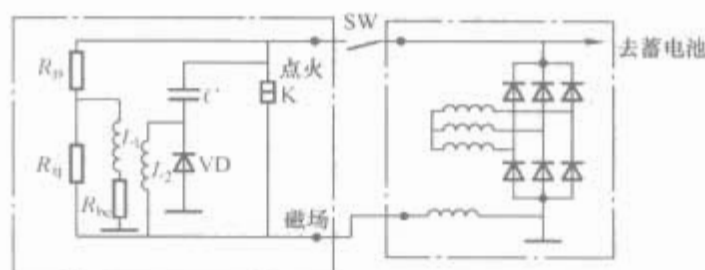


图 1.2-42 FT111 型调节器电路原理

一对触点,调节容易,不仅减小了触点的火花,使触点寿命延长,而且减弱了对无线电的干扰。此外,当触点打开时,由于自感电流通过 L_2 时产生退磁作用,因此又加速了触点的闭合,使触点的振动频率提高。

2.2.4.3 双级电磁振动式调节器

(1) 基本线路。图 1.2-43 所示为双级电磁振动式调节器的基本线路,它与单级式的区别仅在于多装了一对高速触点 K2,且高速触点 K2 是搭铁的;此外,调节器电阻值与单级式的相比也小得多。

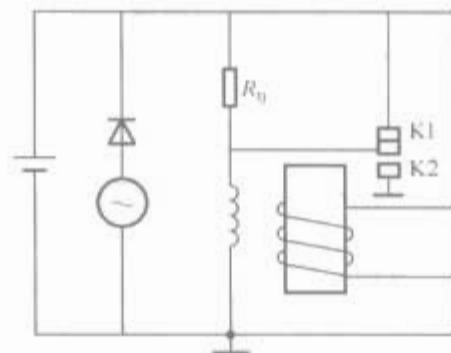


图 1.2-43 双级电磁振动式调节器基本线路

双级电磁振动式调节器的工作原理:调节器不工作时,低速触点 K1 闭合,高速触点 K2 则处于打开状态。发电机低速运转时,低速触点的工作情况和前述只有一对触点的单级电磁振动式电压调节器相同。当发电机升至某一转速,衔铁处于中间位置,触点 K1、K2 均打开,调节电阻 R_q 始终串入激磁回路。这时,磁场电流最小。转速继续升高,电压和磁场电流也随之升高,衔铁进一步下移,使高速触点 K2 闭合,磁场绕组被短路,磁场电流减小为零,电压因此而迅速下降。电压下降使磁化线圈的吸力减小,高速触点 K2 打开,衔铁又处于中间位置。磁场电流又经过 R_q 流入磁场线

圈，电压又升高。如此反复，高速触点 K2 振动，使发电机电压保持稳定。

双级电磁振动式电压调节器的优点是，触点火花小，调节器适用转速范围大。设计调节器时，使其大部分工作在第二级，第一级转速范围不大， R_0 可设计得较小，约为单级式的 $1/10 \sim 1/7$ ，所以低速触点切断功率很小，火花大大减小。高速触点闭合时，磁场绕组被短路，打开时，不会有火花，故使用寿命长。

装用双级式调节器时，发电机的工作特性如图 1.2-44 所示。其中 $n_1 \sim n_2$ 为第一级调节器工作时的调节范围， $n_2 \sim n_3$ 为第二级高速触点工作时调节器的调节范围。调节器触点从第一级过渡到第二级工作时，由于弹簧拉力、衔铁与铁心的空气隙发生变化，两级调节电压的平均值也略有不同，出现一个级差 ΔU 。对 12V 电系， ΔU 为 0.5V；对于 24V 电系， ΔU 为 1.0V。

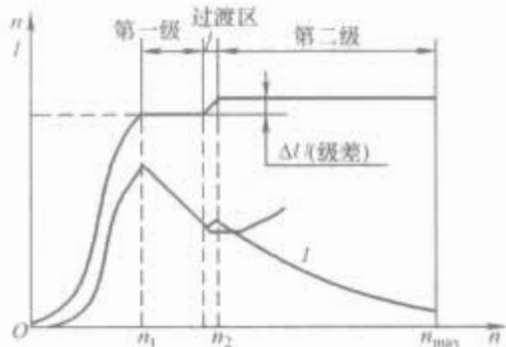


图 1.2-44 具有双级式电压调节器时发电机的工作特性曲线

级差电压 ΔU 随高速触点间隙以及衔铁与铁心间气隙的不同，可为正级差，即第二级高速触点的工作电压高于第一级低速工作触点的工作电压；也可为负级差，即第二级高速触点的工作电压低于第一级低速工作触点的工作电压，如图 1.2-45 所示。一般说来，衔铁与铁心间气隙增加时，为正级差；而气隙不变，高速触点间隙减小时，为负级差。

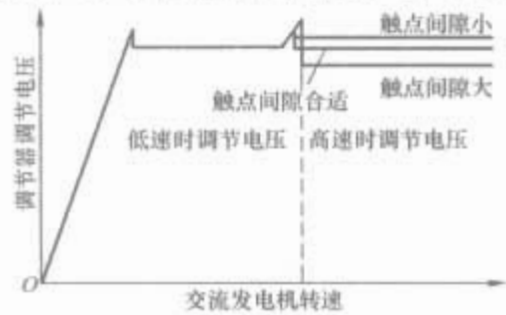


图 1.2-45 级差电压 ΔU 的变化

上述双级式调节器虽然使触点火花减小，调节器适用转速范围大，但由于有两对触点，且高速触点间隙很小，一般为 0.2~0.4mm，调整比单级式困难；当高速触点之间夹有尘土不导电时，闭合后就不能将磁场绕组短路，电压将随转速升高而升高，使发电机和用电设备有被烧坏的危险。为此，双级式调节器的盖子与底座之间密封必须良好。

(2) FT61 型双级电磁振动式调节器。FT61 型双级电磁振动式调节器可与 14V、350~500W 的内搭铁交流发电机配套，如与东风 EQ1090 等车用交流发电机配套使用。

FT61 型调节器结构及内部线路如图 1.2-46 所示。 R_{bc} 由镍铅丝制成，其电阻温度系数很小。由于它串入磁化线圈电路中时，可使整个磁化线圈电路中的电阻值随温度的变化相应减小，能使调节的电压值不随温度的增高而增高。磁化线圈 3 的一端经 R_{bc} 搭铁，另一端接在 R_{js} 、 R_0 之间，并通

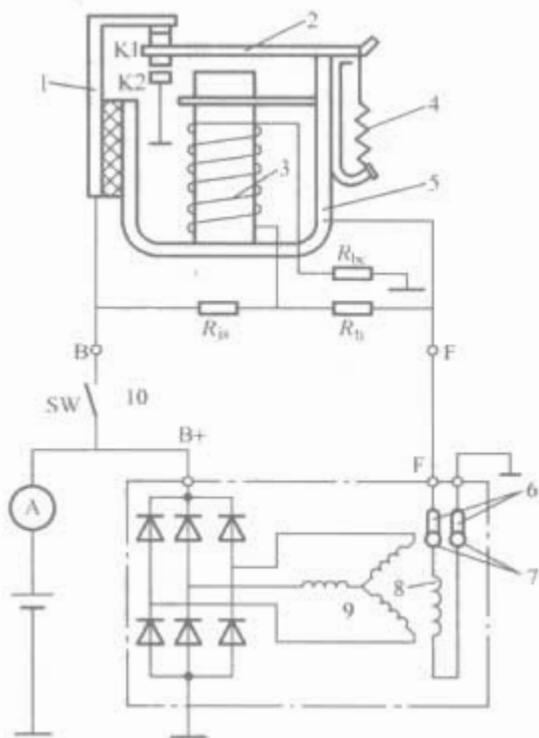


图 1.2-46 FT61 型双级电磁振动式调节器线路图
1—静触点支架；2—衔铁；3—磁化线圈；4—弹簧；5—磁轭；6—电刷；7—集电环；8—磁场绕组；9—三相绕组；10—点火开关； R_{js} —加速电阻（1Ω）； R_0 —调节电阻（8.5Ω）； R_{bc} —补偿电阻（13Ω）

过 R_{js} 、点火开关 SW 与发电机火线接线柱“B+”相接，承受发电机的端电压。

除上述 FT61 型双级电磁振动式调节器的结构形式以外，还有另几种常用的结构形式，如图 1.2-47 所示。虽具体结构各有所异，但其共同特点是都有两对触点，动断的为低速触点（图 1.2-47 中的 1），动合的为高速触点（图 1.2-47 中的 2），其工作原理也基本相同。



图 1.2-47 双级电磁振动式电压调节器的几种结构形式

2.2.5 充电指示灯电路

汽车电源系统正常工作是保证汽车电器设备正常工作的前提，因此对发电机和调节器的工作状态设有监测和显示装置，使驾驶员能随时掌握其工作是否正常。常用的监测和显示装置分为仪表显示和充电指示灯两种形式。仪表显示即利用电流表或电压表指示发电机工作时的充电电流或充电电压值，由此来监视和判断发电机是否工作正常；充电指示灯则是装在驾驶室仪表板上的一个指示灯，当发电机正常工作时熄灭，而当发电机或调节器出现故障时则点亮以提示驾驶员及时检修。

充电指示灯的设置方法各有特点，但从控制原理上可大致分为三种方式：利用中性点电压通过继电器控制、利用具有三个磁场二极管的九管交流发电机控制及采用隔离二极管进行控制。

2.2.5.1 利用中性点电压控制充电指示灯

交流发电机定子绕组采用星形接法时都有一中性点 N，该点的直流平均电压与发电机的直流输出电压同步变化且为发电机输出电压的一半，所以几乎所有采用星形接法的六管（或带中性点二极管的八管）交流发电机都是利用该点的电

压,通过继电器或有关电路去控制充电指示灯的。

在实际使用中,为了减少发电机与充电指示继电器、调节器等部件的连接导线,减少由于接线错误等造成的故障,通常都将充电指示继电器与电磁振动式调节器组合为一体,封装在一个壳体内,即形成具有电压调节和充电指示灯控制双重功能的组合调节器或双联调节器,如国产 FT126 型双联调节器。

国产 FT126 型双联调节器线路图如图 1.2-48 所示,它由电压调节器和充电指示继电器两部分组成,可与日本产品互换使用。

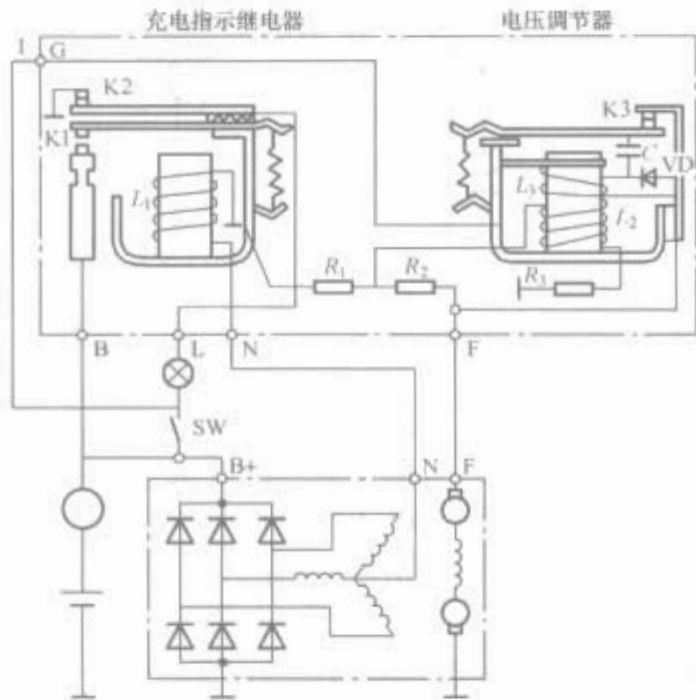


图 1.2-48 FT126 型双联调节器线路图

电压调节器为具有灭弧系统的单级式调节器,其构造和工作原理与 FT111 型基本相同。

充电指示继电器的铁心线圈 L_1 承受的是发电机中点电压,它控制着两对触点 K_1 和 K_2 。其中动断触点 K_2 与充电指示灯串联,动合触点 K_1 则又控制着电压调节器磁化线圈 L_2 的电路。其工作原理为:当接通点火开关 SW 时,蓄电池电流经电流表、充电指示灯、接线柱“L”、动断触点 K_2 至搭铁构成回路,于是充电指示灯发亮。与此同时,蓄电池电流又经接线柱“IG”、触点 K_3 流至磁场绕组,对交流发电机进行激磁。

发电机起动后,交流发电机在他激状态下电压升高,当电压接近充电电压时,中点电压使充电指示继电器的线圈 L_1 吸动衔铁,于是 K_2 打开、 K_1 闭合。 K_2 打开,切断了充电指示灯的电路,指示灯熄灭表示正常充电。反之,当充电系统有故障时,发电机没有电压,其中点 N 也无电压输出,充电指示继电器的衔铁不动作,充电指示灯通过 K_2 搭铁而常亮,从而显示充电系统有故障。 K_1 闭合时,接通了电压调节器磁化线圈的电路。

电压调节器磁化线圈 L_2 的电路为:发电机正极(接线柱“B+”)→接线柱“B”→触点 K_1 →加速电阻 R_1 →磁化线圈 L_2 →温度补偿电阻 R_3 →搭铁→发电机负极。

当发电机电压达到规定值时,在磁化线圈 L_2 的作用下 K_3 打开,加速电阻 R_1 和调节电阻 R_2 串入磁场电路,磁场电流减小,使发电机电压下降。当电压小于规定值时, K_3 重新闭合,电压重又升高,如此往复,使电压不超过规定范围。 VD 、 L_3 和 C 组成灭弧系统,用来保护触点 K_3 。

FT126 型调节器在 50% 负载时调节电压为 13.8~14.8V,充电指示继电器的动作电压为 4.5~5.5V。

2.2.5.2 利用具有三个磁场二极管的九管交流发电机控制充电指示灯

九管交流发电机的特点是发电机中除了一般常用的六只二极管外,又增加了三个功率较小的二极管,它专用来供给磁场电流,所以又称为磁场二极管。

图 1.2-49 所示为九管交流发电机充电系统的线路图。

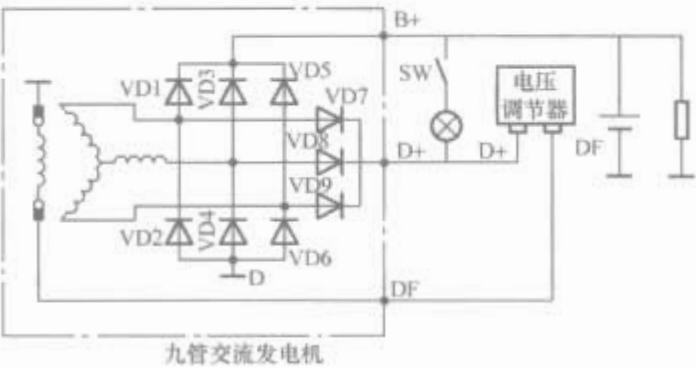


图 1.2-49 九管交流发电机充电系统线路

发电机中 VD_7 、 VD_8 、 VD_9 为磁场二极管。发电机工作时,在发电机定子的三相绕组中产生的三相交流电动势经 $VD_1 \sim VD_6$ 六个二极管所组成的三相全波桥式整流电路整流后,输出直流电压 U_{B+} 向蓄电池充电和向用电设备供电。发电机的磁场电流则由三个磁场二极管 VD_7 、 VD_8 、 VD_9 和三个负极二极管 VD_2 、 VD_4 、 VD_6 组成的三相全波桥式整流电路整流后的直流电压 U_{D+} 供给。

调节器可为电磁式或电子式。

充电指示灯的工作原理如下:

接通开关 SW ,蓄电池电流经充电指示灯→调节器接线柱 $D+$ →电磁振动式调节器中的触点(或晶体管调节器中的大功率管)→调节器接线柱 DF →发电机磁场绕组→搭铁,构成回路。此时充电指示灯亮,指示发电机被激磁。

发电机工作时,充电指示灯是由蓄电池电压与磁场二极管的输出端“ $D+$ ”电压的差值所控制。随着发电机转速的升高,由于“ $D+$ ”电压增高,故充电指示灯的亮度减弱。当发电机电压达到蓄电池充电电压时,发电机开始自激,充电指示灯因两端的电位相等而熄灭,则表示发电机已经正常工作。

当发电机转速降低或发电机有故障时,接线柱“ $D+$ ”电压降低,由于指示灯两端的电位差增大,指示灯又发亮。这样利用该充电指示灯不仅可在停车后发亮警告驾驶员及时关掉电源开关,又可指示发电机的工作情况,同时还省去了结构复杂的继电器。

2.2.6 晶体管调节器

与传统的电磁振动式调节器相比,晶体管调节器具有如下优点:结构简单、工作可靠、故障少;调节精度高;能适应大功率发电机的要求;对无线电设备干扰减小;使用寿命长。

2.2.6.1 基本结构

各种晶体管调节器的结构大致相同,一般是由两三个晶体管、一个稳压管或二极管以及一些电阻、电容等组成。

晶体管调节器大多采用铝合金材料做外壳,将大功率三极管直接安装在外壳上。外壳装有散热片。其他元件一般都装在印刷电路板上,电路板用螺钉固定在调节器底座上。

调节器的引线接头有插头式和接线板式两种。上面分别标有电枢火线“+”、搭铁“-”和磁场“F”。调节器与发电机连接时,应将对应的接线柱相连。晶体管调节器由三个基本部分组成:电子开关部分、开关控制部分和信号检出部分。

信号检出部分即传感器,也叫电压敏感元件,其作用是检出高于规定的供电电压;开关控制部分即控制器,将信号电压变为控制电子开关通断的控制电压;电子开关部分即执

行机构,按控制电压的变化改变发电机激磁绕组电路的通断时间比例。

当发电机电压高于规定供电电压时,电子开关切断激磁电流,使发电机电压迅速下降,当其降至规定电压之后,电子开关又接通激磁电路。如此反复,实现与触点振动式调节器一样的功能,使发电机输出电压稳定在一个容许的范围内。

2.2.6.2 基本原理

(1) 内搭铁晶体管调节器。一种内搭铁晶体管调节器基本原理如图 1.2-50 所示。V2 是功率开关三极管,串联在磁场电路的电源端。晶体管 V1 将电压检测电路送来的电压放大后用来控制功率开关三极管的导通和截止。发电机电压信号的采集和控制电路由 R_1 、 R_2 和稳压管 VD 组成; R_1 、 R_2 构成分压器,和发电机并联,承受发电机的端电压 U_B ;稳压管 VD 控制 V1 的导通和截止。

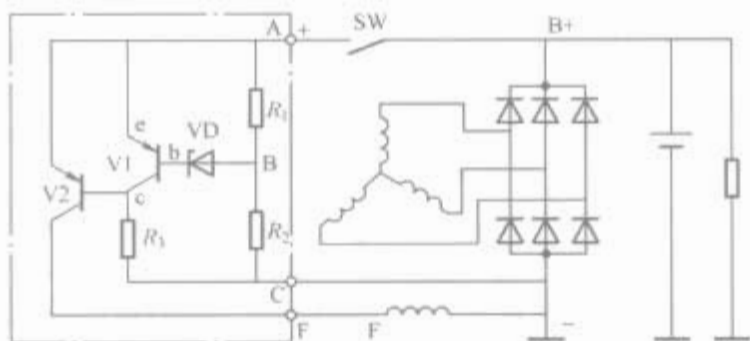


图 1.2-50 内搭铁晶体管调节器的基本电路

合上点火开关 SW 后,蓄电池电压便加在 A、C 两端。 R_1 上的分压 U_{AB} ,通过晶体管 V1 的发射极加到稳压管 VD 上,由于蓄电池电压低于发电机的规定电压值,加到稳压管上的电压值也低于稳压管的反向击穿电压 U_{VD} ,稳压管 VD 截止,V1 因无基极电流而截止,V2 则由 R_3 提供偏置电流而处于饱和导通状态,蓄电池经 V2 向发电机磁场绕组提供电流。

发电机继续运转,其端电压会迅速上升,当其电压超过规定值时,加到稳压管的电压超过其反向击穿电压时,稳压管导通,V1 因获得基极电流而开始导通。稳压管导通后,V2 截止,切断发电机的激磁电路,发电机电压迅速下降。当发电机电压低于规定值时,加到稳压管上的电压值又低于稳压管的反向击穿电压 U_{VD} ,稳压管 VD 截止,V1 因无基极电流而截止,V2 重新导通,接通发电机的磁场电路,发电机电压又升高。如此反复,以维持发电机电压不变。

(2) 外搭铁晶体管调节器。基本电路如图 1.2-51 所示。功率三极管串联在发电机磁场绕组的搭铁端,应配合外搭铁交流发电机使用才能构成回路。

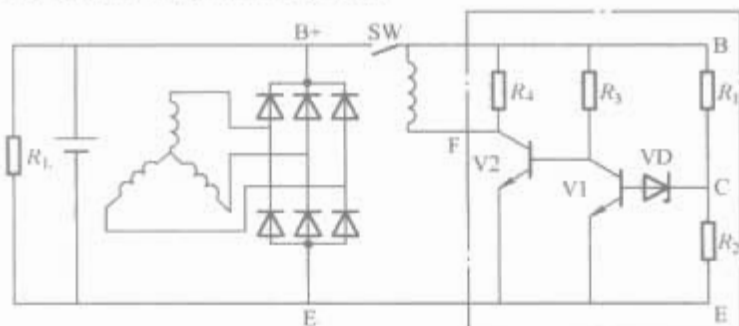


图 1.2-51 外搭铁晶体管调节器的基本电路

2.2.6.3 晶体管调节器实例

(1) JFT126A 型调节器。这种调节器的电路原理如图 1.2-52 所示。

图 1.2-52 中右点划线框为调节器。从左至右依次为信

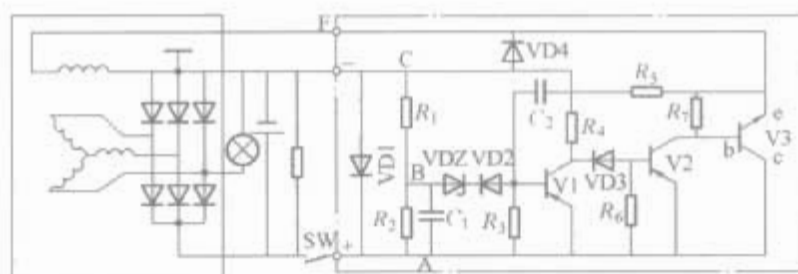


图 1.2-52 JFT126A 型晶体管调节器电路

号检出、开关控制和电子开关部分。大功率三极管 V3 串在发电机磁场电路中,V3 导通,磁场绕组有电流流过,使发电机电压升高。当发电机电压高于规定值时,V3 截止,磁场电路断开,发电机电压急剧下降。降到规定值后,V3 又导通,接通磁场电路,发电机电压重新升高。如此反复,发电机电压被稳定在规定值。

(2) JFT106 型调节器。JFT106 型电压调节器电路如图 1.2-53 所示。

JFT106 型调节器,14V、负极搭铁,可以配 14V/500W 的 9 管交流发电机,也可用于 14V、功率小于 1000W 的 6 管交流发电机。调节电压在 13.8~14.6V 范围内。

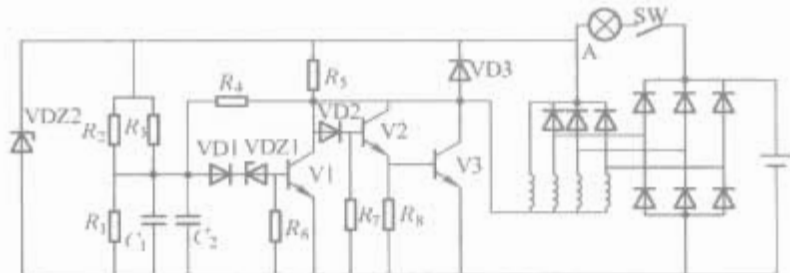


图 1.2-53 JFT106 型晶体管调节器电路

$R_1=1k\Omega$; $R_2=510\Omega$; R_3 —微调电阻; $R_4=240k\Omega$; $R_5=1k\Omega$;

$R_6=510\Omega$; $R_7=510\Omega$; $R_8=1W10\Omega$;VDZ1—2CW;

VDZ2—10W40V;V1—3DG12A,V2—3DG27B;V3—3DD15D;

VD1、VD2—2CP12;VD3—2CZ85D; C_1 、 $C_2=4.7\mu F$

(3) JFT201 型调节器。JFT201 型晶体管调节器电路如图 1.2-54 所示。

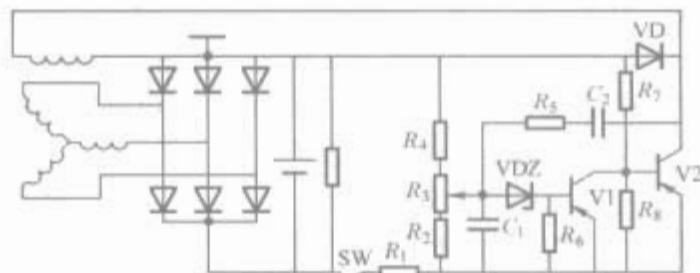


图 1.2-54 JFT201 型晶体管调节器电路

$R_1=0.25\Omega$; $R_2=56\Omega$; $R_3=68\Omega$; $R_4=56\Omega$; $R_5=56\Omega$; $R_6=$

56Ω ; $R_7=180\Omega$; $R_8=56\Omega$;VD—2DZ1A150V;V1—3AX81A;

V2—3AD30C; $C_1=20\mu F$; $C_2=0.22\mu F$;VDZ—2CW15

2.2.7 集成电路调节器

许多国产新型汽车,如北京切诺基 BJ2021EY、天津华利(大发) TJ1010 和夏利 TJ7100、上海桑塔纳、广州标致 505 等,都采用了内装式晶体管或集成电路电压调节器。

集成电路调节器通常由电压控制、激磁电流控制(输出控制)和温度补偿三大部分组成。如图 1.2-55 所示,图中的电压控制部分包括由电阻组成的分压电路,和由稳压管及晶体三极管所组成的电压放大级;输出部分通常由大功率复合管构成;温度补偿一般将热敏电阻与分压电阻并联,或用无源元件与半导体元件一起组成温度补偿网络。

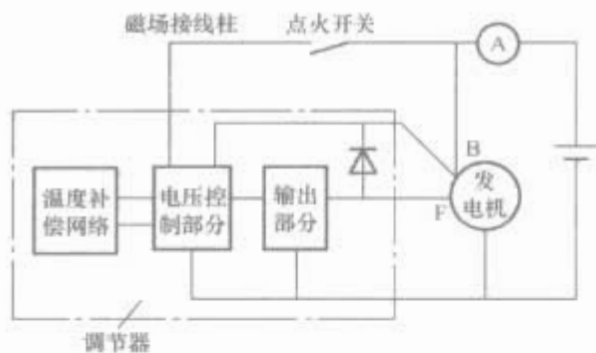


图 1.2-55 集成电路调压器的组成框图

2.2.7.1 典型的集成电路调压器

图 1.2-56 所示为典型的集成电路调压器电路，图中稳压管 VDZ2 起限压保护作用，限制由点火系统传来的过电压，保护调节器不被损坏。其调压原理如下。

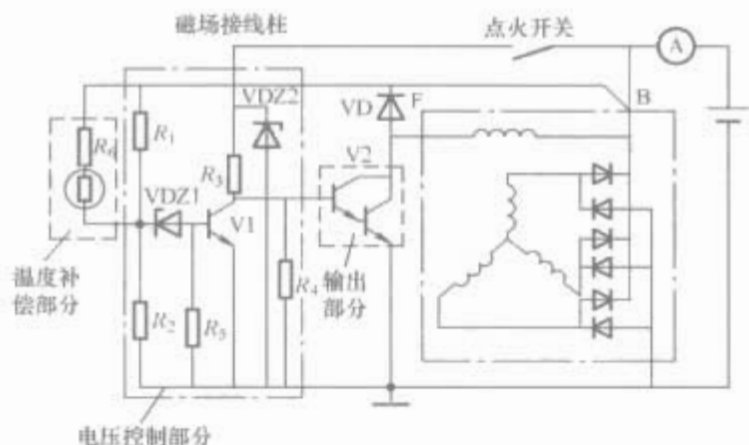


图 1.2-56 典型的集成电路调压器

(1) 当发电机输出电压低于调节电压值时，蓄电池或发电机向其激磁绕组提供激磁电流。此时，蓄电池或发电机通过电阻 R_3 给复合晶体管 V2 的发射极加正向偏压，使 V2 管饱和导通。激磁电流的路径为：蓄电池或发电机的正极→激磁绕组→V2→蓄电池或发电机搭铁负极。

(2) 当发电机输出电压随着激磁电流的增长而上升到调节电压值时，电阻 R_2 两端的分压达到稳压管 VDZ1 的击穿值，使 VDZ1 与 V1 同时导通，V2 截止，发电机激磁回路被切断，激磁电流减小，磁场削弱，发电机输出电压降低。

(3) 当发电机输出电压下降到低于调压值时，V2 又导通，发电机电压上升。如此反复，不断对发电机输出电压进行自动调节，控制其在规定的范围内。

2.2.7.2 JFT151 型集成电路调压器

JFT151 型集成电路调压器为薄膜混合集成电路调压器，其内部电路如图 1.2-57 所示。其工作原理与上述相同：当发电机电压低于规定值时，稳压管 VDZ1 截止，V1 也截止，V2 在 R_4 的正向偏置下导通，激磁电路接通，发电机电压上升；当发电机电压高于规定值时，稳压管被击穿而导通，V1 也导通，则 V2 被短路而截止，激磁电路被切断，发电机电压下降。如此反复，使发电机电压保持恒定。

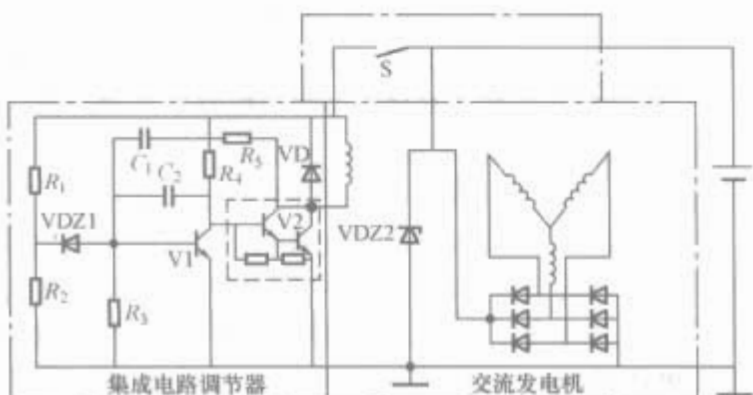


图 1.2-57 JFT151 型集成电路调压器

2.2.7.3 由运算放大器组成的多功能集成电路调节器

该调节器内部电路如图 1.2-58 所示，它是以一个四运算放大器集成电路为核心组成的具有电压调节、过电压保护、充电指示灯控制以及蓄电池低电压检测功能的多功能集成电路调节器。其各功能原理如下：

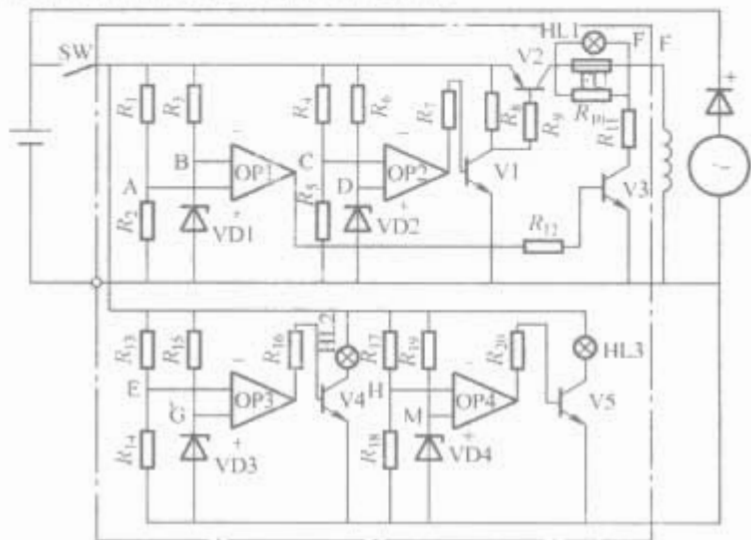


图 1.2-58 由运算放大器组成的多功能集成电路调节器电路

(1) 电压调节功能。电路由运算放大器 OP2、电阻 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_9 ，稳压管 VD2 和晶体管 V1、V2 组成。电阻 R_4 、 R_5 构成分压器，分压器 C 点的电压 U_C 作为发电机输出电压的检测电压， R_6 和稳压管 VD2 通过 D 点给运算放大器 OP2 提供基准电压，OP2 则通过比较 C 点电压 U_C 和 D 点电压 U_D 后输出控制信号，控制 V1、V2 的导通与截止，V2 串联在发电机磁场绕组电路中，用于切断和接通磁场电路。当检测电压 U_C 低于基准电压 U_D 时，OP2 输出高电平，V1、V2 导通，接通了磁场绕组电路，发电机电压便随转速升高而升高；当检测电压 U_C 超过基准电压 U_D 时，OP2 输出低电平，使得 V1、V2 截止，切断了磁场绕组电流，使发电机输出电压下降。如此周而复始，便使发电机电压稳定在规定值。

(2) 充电指示灯控制功能。充电指示灯控制电路由运算放大器 OP3、电阻 R_{13} 、 R_{14} 、 R_{15} 、 R_{16} 、指示灯 HL2 和晶体管 V4 组成。当 E 点电压 U_E 低于基准点 G 点的电压 U_G 时，OP3 输出高电平，V4 导通，指示灯 HL2 亮，表示发电机电压低于蓄电池充电电压或发电机不发电；只有当 $U_E > U_G$ 时，OP3 输出低电平，V4 截止，指示灯 HL2 熄灭，表示发电机充电正常。

(3) 蓄电池电压过低检测功能。蓄电池电压过低检测电路由运算放大器 OP4、电阻 R_{17} 、 R_{18} 、 R_{19} 、 R_{20} 、稳压管 VD4、指示灯 HL3 和晶体管 V5 组成。其原理与上述充电指示灯电路基本相同，只是基准点 H 的基准电压 U_H 设计不同。当合上点火开关，若 HL3 亮，则表示蓄电池电压已低于规定值，应及时进行补充充电。

(4) 过电压保护功能。过电压保护电路由运算放大器 OP1、电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_{10} 、 R_{11} 、 R_{12} 、稳压管 VD1、熔丝 FU、指示灯 HL1 和三极管 V3 组成。当三极管 V1 或 V2 的 C—E 极之间被击穿短路时，磁场绕组的电流将达到最大值而无法进行调节，此时发电机端电压处于失控状态。当发电机端电压 U 上升至规定值时，A 点电压 U_A 将高于 B 点的基准电压 U_B ，此时 OP1 输出高电平，使 V3 导通，FU 将会因电流超过额定值而迅速熔断。由于熔丝断开，指示灯 HL1 点亮，表示调节器有故障。同时，由于熔丝断开，电阻 R_{10} 串入磁场回路，使磁场绕组电流减小，因而发电机端

电压降低,使 $U_A < U_B$,OP1 输出低电平,使 V3 截止。由于电阻 R_{10} 串入磁场回路,使发电机端电压降低,但此时电压仍然随转速升高而增大,当电压升到一定值时, $U_A > U_B$,OP1 输出高电平,使 V3 再次导通,这时磁场电流经 R_{11} 、V3 搭铁而分流,使磁场绕组电流减小,使发电机端电压降低;当低于一定值时, U_A 将低于 U_B ,OP1 输出低电平,使 V3 截止,导致发电机电压又一次上升。通过对元件的选配,可使发电机在很高的转速时,其端电压也不会超过规定值,起到过电压保护的作用。另外,由于熔丝熔断,并联在 R_{10} 两端的指示灯 HL1 点亮,表示调节器有故障。因磁场绕组中仍有一定电流,故发电机仍能工作。

2.2.8 交流发电机的故障检查与测试

2.2.8.1 清洗与解体

清洗:解体前对发电机外部进行清洗或清理,解体后对发电机零部件进行清洗或清理,待检验后装配。

解体:旋下两端盖之间的拉紧螺栓,取出外装式电刷盒。拆下后端盖轴承小护盖,用挤压或轻击的方法,分离转子、定子、后端盖,取出后轴承。用同样方法将前端盖从转子轴上取下,拉出前轴承。最后依次解体各总成。

2.2.8.2 转子检查

(1) 励磁绕组的短路或断路。用万用表测量线圈的电阻,两表针分别触在两集电环上,如图 1.2-59 所示。一般正常的电阻值为 $2.6 \sim 6.0 \Omega$ 。如果阻值小于正常值,即为短路,若阻值为无限大,则为线头脱焊或断路。

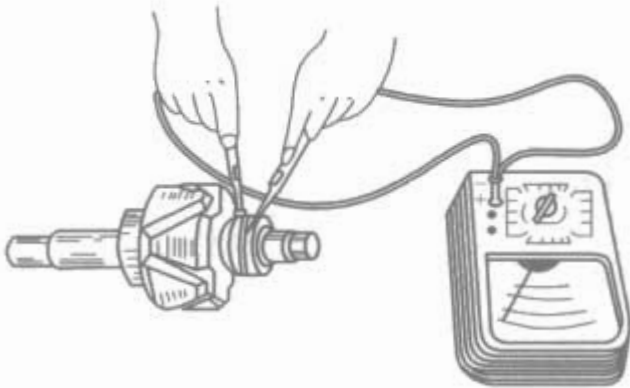


图 1.2-59 励磁绕组短路、断路检查

(2) 励磁绕组、集电环搭铁。将万用表电阻挡置于 $R \times 10k$,两表针分别接触轴和集电环,如图 1.2-60 所示。表针指在无限大为良好。若有阻值,说明有搭铁故障,应检修。

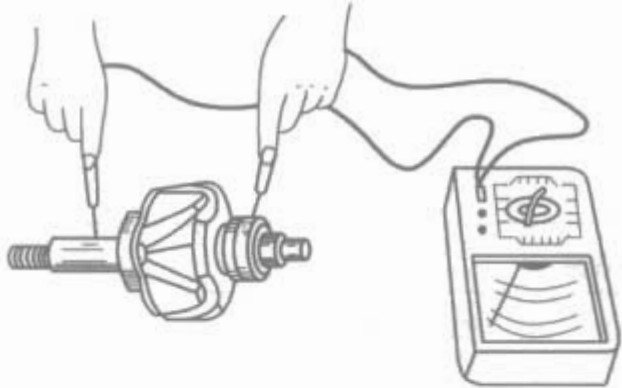


图 1.2-60 励磁绕组搭铁检查

(3) 转子摆差检验。用百分表检查转子摆差,如图 1.2-61 所示。其值应小于 $0.10mm$,否则应予以校正。

(4) 集电环检查。集电环厚度不小于 $1.5mm$,不圆度不超过 $0.025mm$,表面粗糙度不大于 $2.5mm$,否则应更换。

2.2.8.3 定子检查

按图 1.2-62 所示的方法,用万用表检查定子绕组是否断路。按图 1.2-63 所示的方法,检查定子绕组是否搭铁。

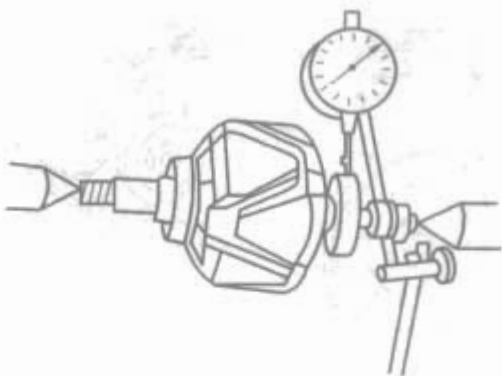


图 1.2-61 转子摆差度的检查

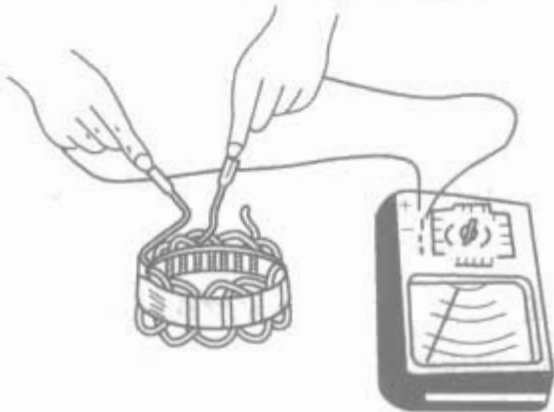


图 1.2-62 定子绕组短路、断路的检查

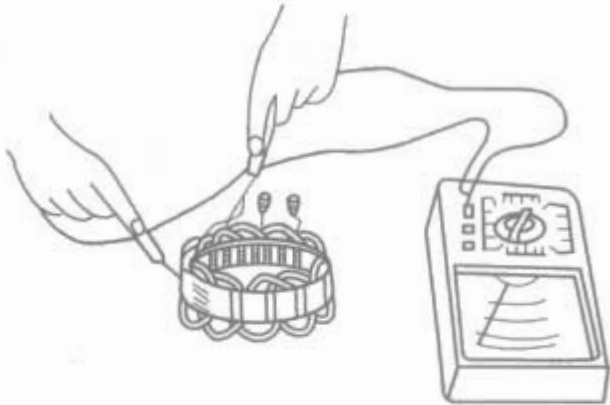


图 1.2-63 定子绕组搭铁的检查

2.2.8.4 检查整流二极管

检查二极管时,应首先将定子绕组与二极管的连线拆开,然后用万用表 $R \times 1$ 挡测量每个二极管的正反向电阻,其正向电阻为 $8 \sim 10 \Omega$,反向电阻为无穷大最好,如图 1.2-64 所示。否则,说明二极管有故障。

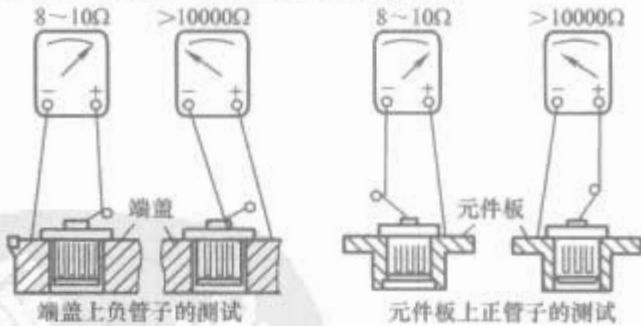


图 1.2-64 检查整流二极管

2.2.8.5 检查电刷与电刷架

电刷长度不得小于 $10mm$,否则应及时更换,电刷架应无裂纹等缺陷。电刷在电刷架内应上下活动自如,无卡滞现象。压紧弹簧应完好,有足够弹性。

2.2.8.6 检查传动皮带

一般每行驶 1 万 km ,即应检查驱动传动带张力,检查方法如图 1.2-65 所示。用拇指压按驱动传动带中点,其挠度应为 $10mm$ 左右,否则,应进行调整。

2.2.8.7 输出特性试验

输出特性试验,可在万能电器试验台上进行,也可单独进行。按图 1.2-66 接好线,测出发电机在空载和满载情况

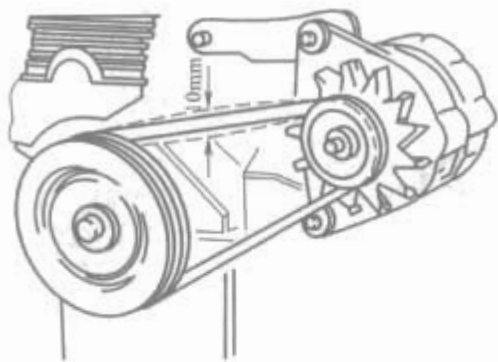


图 1.2-65 检查驱动传动带张力

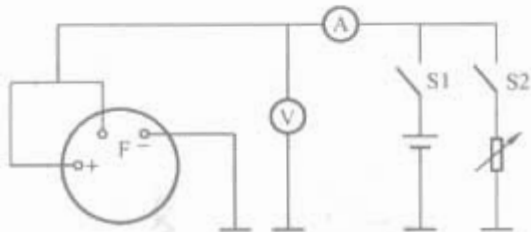


图 1.2-66 交流发电机空载和发电试验

下，发出额定电压时的最小转速，从而判定发电机工作是否正常。

试验时，将发电机固定在试验台上，并由调速电机驱

动。合上开关 S1，由蓄电池供给磁场电流进行他激，逐渐提高发电机转速，并记下电压升高到额定值时的转速，即空载转速。断开开关 S1，使发电机自激。逐渐升高转速，合上开关 S2，同时调节负荷电阻，记下额定负载情况下，电压达到额定值时的转速，即满载转速。试验结果，应符合出厂规定值。

如开始转速过高，或在满载转速下，发电机输出电流过小，则表示发电机有故障。

2.2.8.8 电压波形显示检测

利用示波器显示发电机波形，准确迅速地进行故障诊断和检修质量的鉴定。电压波形的分析如图 1.2-67 所示。

2.2.9 调节器故障检查与调整

充电系统出了故障，经检查确认发电机工作正常而调节器有故障时，应将调节器从车上拆下进行检查。

2.2.9.1 电磁振动式调节器的检查与调整

(1) 触点、电阻和线圈状况的检查。检查触点是否氧化、烧蚀，电阻是否烧断以及线圈有无断路、短路等故障。调节器的线圈、电阻数据见表 1.2-10。

(2) 各部间隙的检验与调整。电磁振动式调节器各部间隙的调整数据见表 1.2-11。

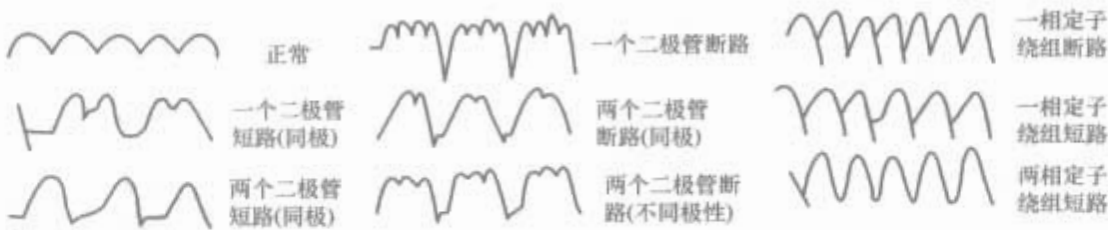


图 1.2-67 交流发电机各种故障的输出电压波形

表 1.2-10 电磁振动式调节器的电阻、线圈数据								
型号	电阻 (Ω, 20℃)			电压调节器线圈			继电器线圈	
	附加电阻	加速电阻	补偿电阻	线径 (mm)	匝数	电阻 (Ω)	线径 (mm)	匝数电阻 (Ω)
FT70	9	0.4	20	0.29	700	7.2	—	—
FT70A	40	2	80	0.21	1540	30	—	—
FT61	8.5	1	13	0.31	820	9.5	—	—
FT61A	40	2	80	0.21	1540	30	维持线圈	第一部分 0.17 1420 35
							第二部分康铜 0.25	—
							起动线圈	0.17 1420 35
FT212	2个 30Ω 并联	—	60	0.20	1280	36	—	—
FT122	4	—	—	内: QZ0.2 康铜 0.25 外: QZ0.1	1150 75~77 1200	65 148	内: QZ0.15 外: QZ0.83	900 32 55~57
FT121	150	4	15	0.31	900	6.8	0.21 0.27	1400 27 700 13
FT221	250	15	60	0.29	1400	18	0.15 0.19	2300 85 1400 52

表 1.2-11 电磁振动式调节器的调整数据						
型号	规格 (V)	高速触点间隙 (mm)	衔铁与铁心间的气隙 (mm)	低载时调节电压值 (V)	低载时调节电压与半载时调节电压的差值 (V)	磁场继电器闭合电压 (V)
FT70	12	0.3~0.4	1.2~1.3	13.8~14.5	≤0.5	—
FT70A	24	0.3~0.4	1.2~1.3	27.6~29.0	≤1	—
FT61	12	0.25~0.3	1.05~1.15	13.2~14.2	≤0.5	—
FT61A	24	0.2~0.3	1.2~1.3	27.6~29.0	≤1	8~10
FT121	14	0.25	1.0~1.2	13.5~14.5	≤0.5	4~5
FT221	28	0.25	1.0~1.2	27.0~29.0	≤1.0	8~10
FT212	28	0.25	1.0~1.2	27.0~29.0	≤1.0	—

(3) 试验与调整。交流发电机调节器需要调整的基本数据是低载时调节电压值及低载与半载调节电压的差值（见表 1.2-11），所需设备与试验交流发电机相同，按图 1.2-68 接线，现以 FT61 型电磁振动式调节器为例加以说明。起动电动机后，先合上开关 S1，让蓄电池向发电机激磁。待发电机自己激磁后，再将开关 S1 打开，闭合开关 S2。在发电机转速为 3000r/min 时，调节可变电阻，使发电机处于低载状况（12V 交流发电机为 4A，24V 交流发电机为 2A），记下调节器所维持的电压值。若不合规定，用改变弹簧张力的方法予以调整，直到调好为止。然后再调节可变电阻，使发电机处于半载状况（输出电流为额定电流的一半），记下调节器所维持的电压值。低载与半载调节电压的差值应符合规定。若超过 +0.5V 时，可适当减小衔铁与铁心间的气隙；若级差为负值，可适当放大衔铁与铁心间的气隙。

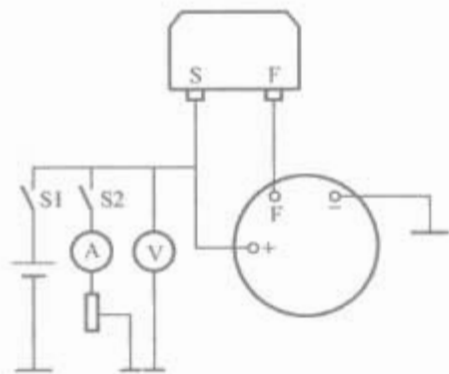


图 1.2-68 交流发电机电磁
振动式调节器的试验

2.2.9.2 晶体管调节器的检查、试验与调整

(1) 故障与检查。晶体管调节器由于使用不当或质量不佳，可能出现的故障见表 1.2-12。

表 1.2-12 晶体管调节器故障及其原因	
现 象	原 因
发电机不发电	大功率三极管断路，稳压管或小功率三极管损坏使大功率三极管始终处于截止
发电机电压过高，充电电流过大，车上灯泡特亮或烧坏，蓄电池电解液沸腾，消耗过快	大功率三极管短路，稳压管或小功率三极管损坏使大功率三极管始终处于饱和导通状态

如出现表 1.2-12 所列故障现象，可将调节器从车上拆下进行检查。方法是使用一个电压可调的直流稳压电源（输出电压 0~30V、电流 3A）和一只 12V（24V）、20W 的车用小灯泡代替发电机磁场绕组，按图 1.2-69 接线后进行试验。

调节直流稳压电源，使其输出电压从零逐渐增高时，灯泡应逐渐变亮。当电压升到调节器的调节电压（14V±0.2V 或 28V±0.5V）时，灯泡应突然熄灭。再把电压逐渐降低时灯泡又点亮，并且亮度随电压降低而逐渐减弱，则说明调节器良好。电压超过调节电压值，灯泡仍不熄灭或灯泡一直

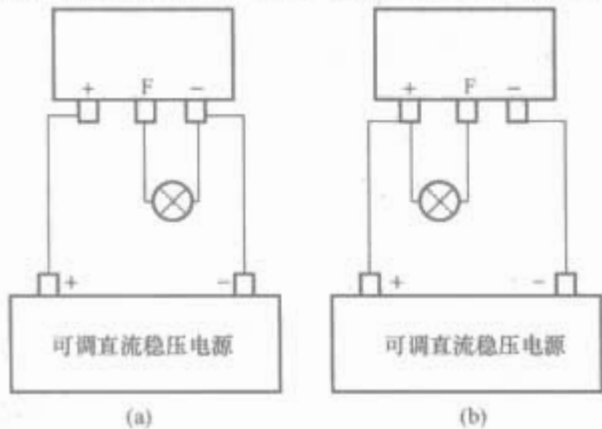


图 1.2-69 判断晶体管调节器的好坏
(a) 内搭铁调节器；(b) 外搭铁调节器

不亮，都说明调节器有故障。

(2) 试验与调整。由于晶体管调节器有内搭铁和外搭铁之分，因此，在调节器的试验和调整前应先判断调节器的搭铁形式。方法是使用一个 12V 蓄电池和一只 12V、2W 的小灯泡按图 1.2-70 接线，即可判断调节器的搭铁形式。

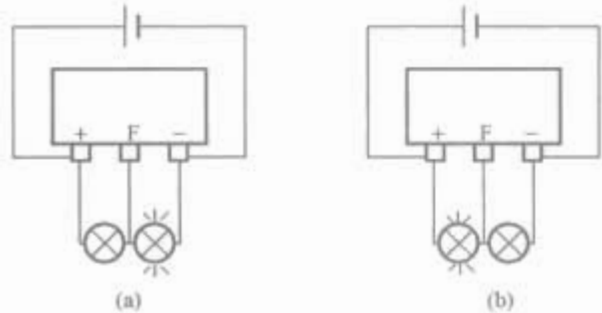


图 1.2-70 晶体管调节器搭铁形式判断
(a) 内搭铁调节器；(b) 外搭铁调节器

如灯泡接在“-”与“F”接线柱之间发亮，而在“+”与“F”接线柱之间不亮，则该调节器为内搭铁式；反之，如灯泡接在“+”与“F”接线柱之间发亮，而接在“-”与“F”接线柱之间不亮，则该调节器为外搭铁式。

判断出调节器的搭铁形式后，便可根据调节器的搭铁形式按图 1.2-71 接线进行试验。

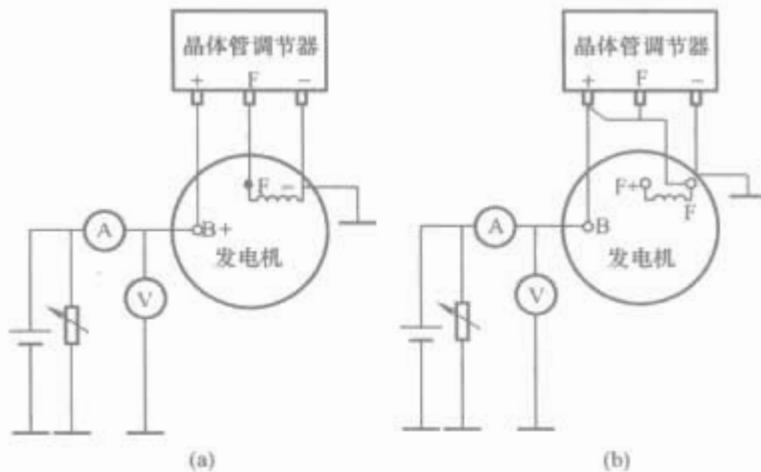


图 1.2-71 晶体管调节器测试接线
(a) 内搭铁晶体管调节器；(b) 外搭铁晶体管调节器

试验时将发电机转速控制在 3000r/min，试验方法与试验电磁振动式调节器相同。调节可变电阻，使发电机处于半载时，记下调节器所维持的电压值，该电压值应符合表 1.2-13 的规定。

表 1.2-13 晶体管调节器的调整数据			
型 号	额定电压 (V)	配合工作的发电机 型号或发电机 额定功率(W)	发电机转速为 3000r/min, 输出为半载时的调节 电压值(V)
JFT124 JFT126	14	JF13、JF15 系列	13.5~14.5
JFT244 JFT246	28	JF23、JF25 系列	27~29
JFT201	14	JF01、JF11、JF21 系列	13.5~14.5
JFT201A	28	JF12、JF22、JF1000	27~29
JFT106	14	JF750	13.5~14.5
JFT107	14	JF01、JF11、JF21	13.5~14.5
JFT206	28	≤1000W	27~29
JFT207	28	JF21、JF22	27~29
JFT141	14	350W、500W	13.8~14.2
JFT142B	14	350W、500W	13.8~14.2
JFT241	28	350W、500W	27.5~28.5
JFT242B	28	350W、500W	27.5~28.5
JFT204	28	≤6000W	27.5~28.5

若调节电压值不符合规定,应加以调整。当调节器中有调整电位器时(如JFT201型调节器),可利用电位器进行调节使调节电压符合规定。如调节器中无调整电位器,但调节器电路可拆出的话,可通过调整分压器电阻使之符合规定。大多数厂家为了提高晶体管调节器的防潮、耐振性能,将调节器用树脂封装为不可拆式结构。这类调节器如调压值不符合规定,应报废。

2.2.9.3 集成电路调节器的检查

由于集成电路调节器都是用环氧树脂封装或塑料模压而成的全密封结构,因此损坏或失调后,只能更换新品而无法修复或调整,故只需检查出调节器好坏即可。

判断集成电路调节器好坏的最简单的方法是就车检查。检查之前,应首先搞清楚发电机、集成电路调节器与外部连接端子的含义。

带有集成电路调节器的整体式交流发电机与外部(蓄电池、线束)连线端子通常用“B+”(或“+B”、“BAT”)、“IG”、“L”、“S”(或“R”)和“E”(或“-”)等符号表示(这些符号通常在发电机端盖上标出),其代表的含义如下:

“B+”(或“+B”、“BAT”)——发电机输出端子,用一根很粗的导线连至蓄电池正极或起动机上。

“IG”——通过线束接至点火开关。有的发电机上无此端子。

“L”——充电指示灯连接端子,该导线通过线束接仪表板上的充电指示灯或充电指示继电器。

“S”(或“R”)——调节器的电压检测端子,通过一根稍粗的导线通过线束直接连接蓄电池的正极。

“E”——发电机和调节器的搭铁端子。

就车检查集成电路调节器所需的设备与检查晶体管调节器时相同。

首先拆下整体式发电机上所有连接导线,在蓄电池正极和交流发电机“L”接线柱之间串一只5A电流表。如无电流表,可用12V/20W车用灯泡代替(对24V调节器可用24V/25W的车用灯泡)。再将可调直流稳压电源的“+”接至交流发电机的“S”接头,“-”与发电机外壳或“E”相接,如图1.2-72所示。

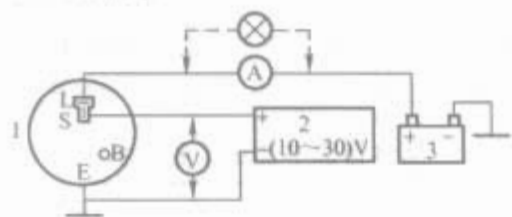


图 1.2-72 集成电路调节器的检查

1—交流发电机;2—可调直流稳压电源;3—蓄电池

接好后,调节直流稳压电源,使电压缓慢升高,直至电流表指零或测试灯泡熄灭,该直流电压就是集成电路调节器的调节电压值。如该值在13.5~14.5V的范围内,说明集成电路调节正常。否则,说明该集成电路调节器有故障。

2.2.9.4 调节器的代换

调节器在使用过程中若损坏而又无法买到原配件时,就产生了调节器的代用问题。尤其是进口汽车,车型复杂,改进也快。若调节器损坏,很难买到原配调节器,即使能买到其价格也很昂贵。因此,调节器的代用,特别是用国产调节器代换进口汽车发电机的调节器是很有意义的。

调节器的代换应遵循以下原则:

- (1) 标称电压应相同。
- (2) 代用调节器所配发电机功率应与原发电机功率相同

或相近。

(3) 搭铁形式应相同。如代用调节器的搭铁形式与发电机的搭铁形式不同,可改变发电机的搭铁形式。

(4) 代用调节器的结构形式应尽量相同或相近,这样可使接线变动最小,代换容易成功。

(5) 安装代用调节器时,应尽量装在原位或离发电机较近处。

2.2.10 交流发电机及调节器的使用

交流发电机结构简单,维护方便。若能正确使用,不但故障少,且寿命长;若使用不当,则会很快损坏。在使用和维护中应特别注意以下几点:

(1) JF系列的交流发电机为负极搭铁,蓄电池搭铁极性必须与此相同,否则蓄电池将通过硅二极管放电,使硅二极管立即烧坏。

(2) 发电机运转时,不要用试火花的方法检查发电机是否发电,否则容易损坏二极管。

(3) 发电机不发电或充电电流很小时,应及时找出故障加以排除,不应再长期继续运转。因为如果有一个二极管短路,发电机就不能发电,继续运转就会引起其他二极管或定子绕组被烧坏。

(4) 整流器的六只硅二极管与定子绕组相连接时,绝对禁止用绝缘电阻表或220V交流电源检查发电机的绝缘情况,否则将使二极管击穿而损坏。

(5) 发动机停熄时,应将点火开关断开。否则,蓄电池电流将长期流经磁场绕组和调节器磁化线圈,使蓄电池长期放电,并将线圈烧坏。

(6) 发电机与蓄电池之间的导线要连接可靠,如突然断开,将会产生过电压,易损坏二极管。

(7) 交流发电机应与专用调节器配合工作。

(8) 配用双级电磁振动式调节器时应特别注意,当检查充电系统的故障时,在切断发电机与调节器的连接线以前,不允许将发电机的“+”与“-”(或调节器的“S”与“-”)短接,否则将会烧坏调节器中的高速触点。

(9) 在配用晶体管调节器时,接线必须正确,否则易损坏晶体管。更换晶体管时,焊接用的电烙铁不得高于45W,焊接要迅速,最好用金属镊子捏住管脚加强散热,以免损坏晶体管。

(10) 诊断充电系统故障时,不允许在中速或更高速度下使调节器短路,否则若发电机无故障时会因电压过高而击穿发电机整流二极管。

2.2.11 其他形式车用交流发电机简介

2.2.11.1 永磁式无刷交流发电机

永磁式交流发电机是以永久磁铁作为转子磁极而产生旋转磁场的,不仅去掉了电刷和滑环,而且不需要磁场绕组和爪极,因此具有结构简单可靠、使用寿命长的优点。而除转子外的其他部分则与普通交流发电机相同。

转子的结构与永久磁铁的材料、加工工艺、最高使用转速等有关,对发电机的性能、外形尺寸、运行可靠性等有多方面的影响。常用的永磁材料有铁氧体、铝镍钴、稀土钴和钕铁硼等。其中钕铁硼永磁为第四代超强永磁材料,其剩磁和矫顽力都非常高,且退磁曲线为直线,回复线与退磁曲线基本重合,其商用最大磁能积已达2866kJ/m³,用于电机后,可提高电机的磁负荷、减少电机的体积与质量,而且原料丰富,因此是一种比较理想的永磁材料。当钕铁硼永磁用于车用交流发电机时,由于它有较高的剩磁和矫顽力,因此转子磁极可采用如图1.2-73所示的瓦片式结构用环氧树脂

黏在导磁轭上，磁极之间呈
 鸽尾型，用胶填充。

这种结构不仅可减少永
 磁材料的用量，而且能很好
 地平衡相邻磁极间的吸引力
 与切向力，保证高速时不
 移位。

由于转子采用永磁结
 构，所产生的旋转磁通 Φ 是
 不变的或不可调的，因此在
 定子绕组中产生的三相交流
 感应电动势将只随发电机转
 速变化。因此，不能采用普
 通交流发电机控制磁场电
 流的原理来调节发电机的
 输出电压。

为解决这一问题，可采
 用电压调节器与三相半控桥
 式整流电路相配合的方案，
 其电路原理如图 1.2-74 所
 示。

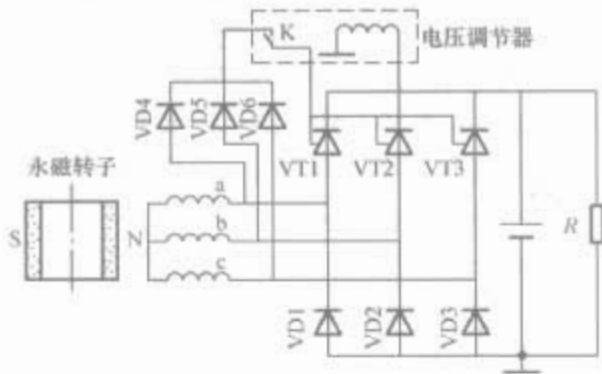


图 1.2-74 永磁交流发电机整流电路及电压控制原理

三只共阳极硅二极管 VD1、VD2、VD3 与三只共阴极
 晶闸管 VT1、VT2、VT3 组成三相半控桥式整流电路。另
 外由硅整流二极管 VD1~VD6 组成三相全波整流电路，为
 晶闸管控制极提供触发电压，与电压调节器的一个触点相
 接，另一个触点则与晶闸管的控制极相连，电压调节器的
 线圈并接在三相半控桥的输出端。其电压控制原理如下：
 当交流发电机转速较低时，电压调节器触点 K 闭合，晶
 闸管的控制极获得正向触发电压而导通，当转速达到一定
 值后，整流桥可向蓄电池和负载提供三相全波整流电压。
 随着发电机转速的进一步升高，整流输出电压也增大，如
 图 1.2-75 中的实线所示。当整流输出电压超过额定电压
 达到 U_2 值时，电压调节器触点 K 断开，晶闸管失去正
 向触发电压而截止，因而整流输出电压下降，如图 1.2-75
 中的虚线所示。当整流电压降到 U_1 时，电压调节器线
 圈电流减小而使 K 闭合，三只晶闸管重新被触发导通，
 使整流输出电压回升。如此反复，便可使输出电压被控
 制在规定的范围内。

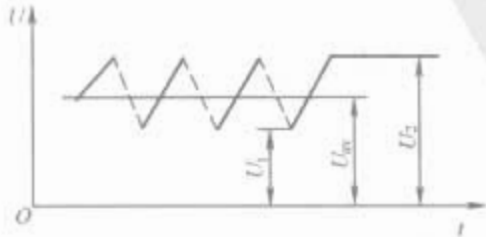


图 1.2-75 带电压控制的永磁交流发电机输出
 电压恒定原理
 U_{av} —平均电压

永磁交流发电机具有以下优点：

(1) 体积小、重量轻、结构简单、维护方便，使用寿命
 长。如 750W 的钕铁硼永磁车用发电机与 350W 普通交流发

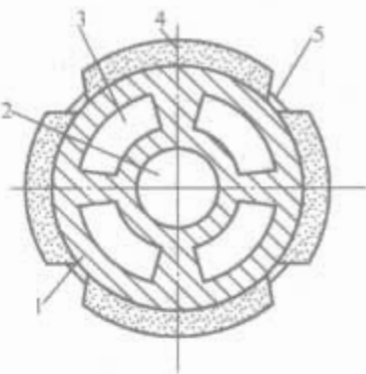


图 1.2-73 钕铁硼永磁
 转子的结构
 1—导磁轭；2—转轴；
 3—通风口；4—永磁体；
 5—环氧树脂胶

电机重量相当，转子上除轴承外无磨损件，而且外有通风
 孔，加强了冷却散热，因而寿命可提高两倍以上。

- (2) 由于传动比大，所以低速充电性能好。
- (3) 比功率大，可节约大量金属材料。
- (4) 无激磁损耗，效率可提高 10% 以上。
- (5) 在电压控制器中，由于只有控制极约 10mA 的电流通过触点，故可降低触点磨损，调节器结构大大简化。
- (6) 由于永磁体的磁导率接近空气的磁导率，使电枢反应的磁阻增大，因而非正弦畸变减小。

2.2.11.2 带泵交流发电机

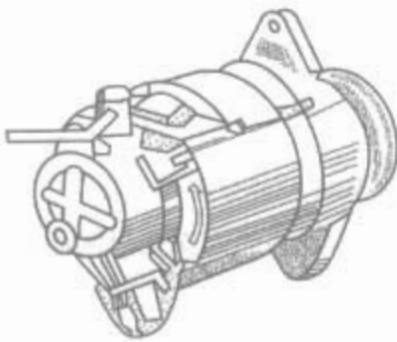


图 1.2-76 国产 JFB2525 型
 带泵交流发电机

带泵交流发电机的发
 电机部分与普通交流发电
 机完全一样，只是其转子
 轴较长并从后端盖中心伸
 出，然后在发电机后端盖
 上安装有真空泵，利用伸
 出的发电机转子轴外花键
 与真空泵转子的内花键相
 连接。当发电机旋转时，
 发电机转子便带动真空泵
 一同旋转，从而形成一个

真空源。其外形如图 1.2-76 所示。

带泵交流发电机主要用于没有真空来源的柴油车（汽油
 机可直接从进气歧管处取得真空），作为真空助力制动系统
 中的真空动力源及其他用途的真空来源。

3 起动机

3.1 起动系统的要求

汽车的发动机是靠外力起动的，常用的起动方法有人力起
 动、辅助汽油机起动和电力起动机起动等。人力起动以手摇
 或绳拉，最为简单，但不方便。用手摇起动只作为汽车的后备
 起动手段。辅助汽油机起动很麻烦，又很笨重，仅用在大型拖
 拉机上。电力起动机起动简称起动机起动，操作轻便，起动迅
 速可靠，还可重复起动，在汽车上得到了广泛应用。

3.1.1 发动机起动要求

为了使内燃机正常起动并持续运转，下列标准应符合要
 求：

- (1) 可燃混合气体。
- (2) 压缩行程。
- (3) 点火方式。
- (4) 最小起动转速（大约 100r/min）。
- (5) 为了实现前三个要求，最小起动速度必须达到要求，这就需要借助于起动机，影响起动机最小起动转速的主要因素如下：
 - (1) 起动系统的额定电压。
 - (2) 能够起动发动机的最低温度，即极限起动温度。
 - (3) 发动机的曲轴阻力，即发动机在极限起动温度下曲轴所需的转矩。
 - (4) 蓄电池的特性。起动机的作用是将蓄电池的电能为机械能，驱动发动机飞轮旋转，实现发动机的起动。
 - (5) 在蓄电池和起动机之间的电压降。
 - (6) 起动机与飞轮齿圈齿轮之间的传动比。
 - (7) 起动机的特性。
 - (8) 发动机在极限起动温度时的最低曲轴转速。

在汽车电气系统中，不可能把起动机看成一个独立的系

统（见图 1.2-77）。这是因为起动系统还与汽车其他许多系统有关系。其中，蓄电池最为重要。

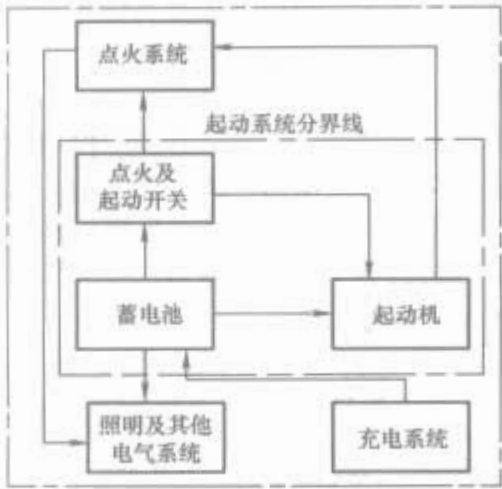


图 1.2-77 作为整个电气系统一部分的起动系统

另一个对发动机起动要求最为重要的因素是极限起动温度。随着起动温度的上升，起动机的转矩不断下降，发动机在最小转速下所需的转矩是不断升高的（见图 1.2-78）。最低极限温度因汽车不同而各异，轿车为（-25~-18）℃，卡车及公共汽车为（-20~-15）℃，而起动机制造商建议在（-20~+20）℃之间。

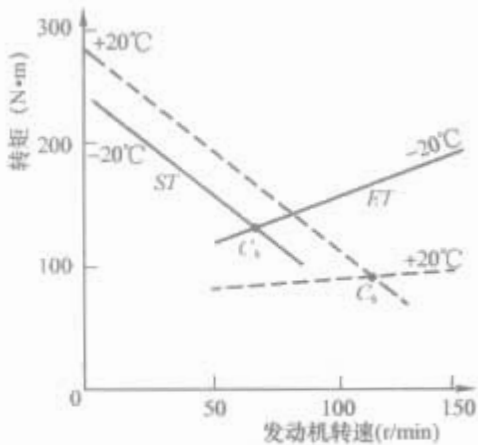


图 1.2-78 起动机转矩及发动机曲轴转矩特性
ST—起动机转矩；ET—发动机转矩；
C_s—曲轴转速

3.1.2 起动系统设计

汽车的起动系统除满足上述要求外，还应满足以下几点要求：

- (1) 寿命长及维修方便。
- (2) 能长时间工作。
- (3) 工作可靠，能经受住起动、振动、腐蚀及温度等因素的影响。
- (4) 结构紧凑、重量轻。

图 1.2-79 为起动系统基本组成示意图。由于发动机的设计与型号各异，所以不同类型发动机起动时的最小曲轴转速是不同的。部分典型的发动机最小曲轴转速见表 1.2-14。



图 1.2-79 起动系统组成示意图

此表中的数据是在-20℃时测得的。

表 1.2-14 不同类型发动机起动时所需的最小曲轴转速

发动机类型	最小曲轴转速 (r/min)
往复点燃式发动机	60~90
转子点燃式发动机	150~180
带加热塞的柴油机	60~140
无加热塞的柴油机	100~200

轿车起动系统的额定电压几乎均为 12V。卡车和公共汽车一般是 24V，它们可以只使用一半的电流就能与 12V 系统产生相同的功率。这样也可以减少线路中的电压降，这是因为商用汽车上的电线长度要比轿车长得多。

起动机的额定输出可以在测试台上确定。将供给起动机的最大容量蓄电池用阻值为 1mΩ 的电线接到起动机上，该蓄电池在-20℃时有 20% 的容量降。这些规定能够确保起动机在最不利的环境下仍然能够起动。起动机的实际输出可以在典型工作环境下测知。起动机的额定功率是从蓄电池中获得的，应有少量的铜损（由于电路中的电阻）、铁损（由于电机中铁会生成涡流电流）及机械摩擦损失。

图 1.2-80 为起动机及蓄电池的等效电路，从图中可以看出起动机的输出是怎样受到线路电阻及蓄电池的内阻所影响的。其总电阻越小，起动机输出功率将会越大。

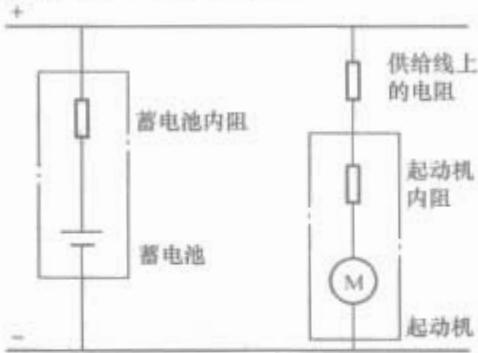


图 1.2-80 起动系统的等效电路

在设计起动系统时还要考虑另外两点：①蓄电池位置。起动机的安装位置通常是预先设计好的，这就需要考虑蓄电池的位置。若蓄电池非常靠近起动机，电线就会变得很短，距离越远就意味着需要更大的接头来确保电阻小一点。②密封问题。起动机需要专门的密封装置来阻止污染物进入，尤其是越野汽车更应注意。

3.1.3 起动机的选择

起动机必须满足前面所讨论过的各项规定。从图 1.2-79 中可以得知起动机的转矩（图中的数据为在最小曲轴转速下测得的发动机曲轴转矩）。

起动机的制造商以特性曲线的形式提供数据，这些数据显示了起动机在-20℃和+20℃时的转矩、转速、功率及电流等的消耗量。

图 1.2-81 为起动机所需功率输出与发动机的型号之间的关系。

在极限起动温度下，发动机每升排量所需的起动转矩见表 1.2-15。

表 1.2-15 不同缸数发动机所需的起动转矩

发动机缸数	每升排量所需的转矩(N·m)
2	12.5
4	8.0
6	6.5
8	6.0
12	5.5

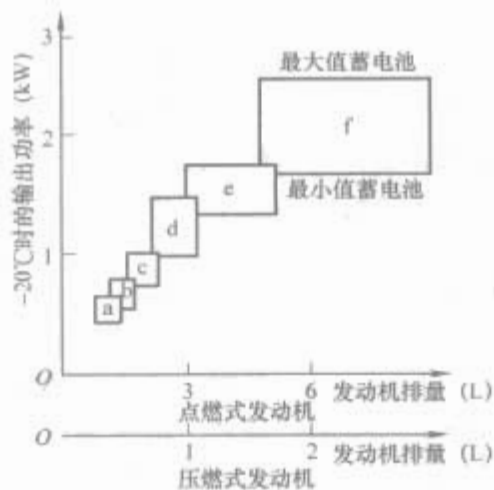


图 1.2-81 起动机所需的功率与发动机型号之间的关系
(从 a~f 为每一起动机覆盖的范围)

汽缸数越少的发动机需要越大的起动转矩，这是因为每一汽缸活塞直径较大，所需起动转矩的峰值就越大。另一个与起动转矩有关的主要因素是压缩比。

要说明转矩和功率间的联系，可以假设：在最差环境下（-20℃），四缸排量为 2L 发动机需要 480N·m 的转矩来克服静摩擦阻力，用 160N·m 的转矩来维持最小曲轴转速（100r/min）。由于起动机小齿轮与飞轮齿圈齿轮的传动比为 10:1，所以发动机必须要能够产生一个 48N·m 的最大静态转矩和一个 16N·m 的驱动力矩。通常起动机的静态起动转矩是驱动转矩的 3~4 倍。

将转矩转换为功率，计算公式为

$$P = T\omega \tag{1.2-43}$$

式中：P 为功率；T 为转矩； ω 为角速度。

$$\omega = 2\pi n / 60 \tag{1.2-44}$$

式中：n 为转速。

在这个例子中，若转速为 1000r/min，则在 16N·m 的转矩下产生的功率是 1680W。查阅图 1.2-81，理想的选择显然是标注为 e 的起动机。

推荐使用额定容量为 55A·h、冷起动电流为 255A 的蓄电池。

3.2 直流电动机

3.2.1 构造

直流电动机主要由机壳、磁极、电枢、换向器及电刷等部分组成。

3.2.1.1 机壳

用钢管制成，一端开有窗口，作为观察电刷与换向器之用，平时用防尘箍盖住。机壳上只有一个电流输入接线柱并在内部与磁场绕组的一端相接。壳体外表面车有沟槽，以利散热。壳内装有磁极。

3.2.1.2 磁极

为了增大起动机的转矩，磁极的数量较多，往往是 4 极，甚至是 6 极；在 4 极中，4 块磁极相对安装，即 S 极对 S 极，N 极对 N 极，如图 1.2-82 所示。图 1.2-82 中虚线为磁力线的回路。

磁场线圈，即激磁绕组，与电枢串联（见图 1.2-83），也是用矩形铜线绕制。绕组的一端接在外壳的绝缘接线柱上，另一端与两个非搭铁电刷 4 相连，当开关 7 将电路接通时，起动机的工作电路为：蓄电池 3 正极→开关 7→接线柱 6→磁场绕组 5→电刷 4→电枢绕组→搭铁电刷→蓄电池 3 搭铁负极。

有的起动机磁场线圈不是 4 极互相串联，而是将两极线

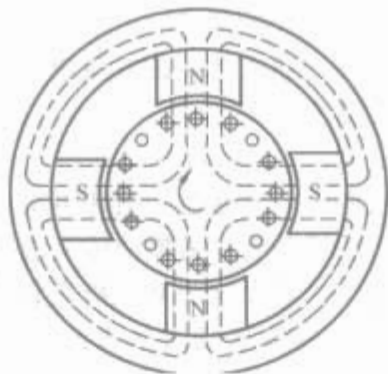


图 1.2-82 磁极与磁路

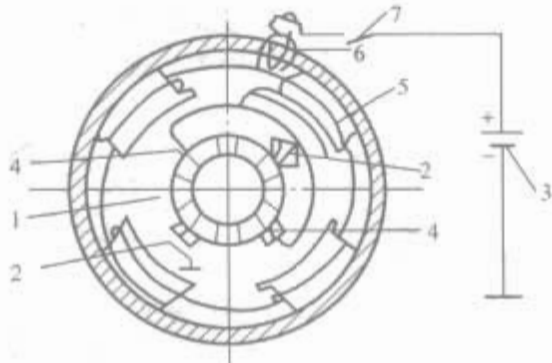


图 1.2-83 起动机的线路连接

- 1—整流子；2—搭铁电刷；3—蓄电池；
4—电刷；5—励磁绕组；
6—接线柱；7—起动开关

圈分别串联后，再并联为两路。如黄河 JN150 用的 ST614 型起动机等就是采用这种接法，这样，在线圈截面尺寸相同的情况下，可增大起动电流，从而增大起动机的扭矩。

3.2.1.3 电刷与电刷架

电刷与电刷架的作用是将电流引入电动机。一般有 4 个电刷架，固定在前端盖上。其中两个电刷架与端盖绝缘称为绝缘电刷架，另外两个电刷架与端盖直接铆合而搭铁，称为搭铁电刷架。

电刷由铜与石墨粉压制而成，加入铜是为了减少电阻并增加耐磨性。电刷装在电刷架中，借弹簧压力将它紧压在换向器上，电刷弹簧的压力一般为 11.7~14.7N。

3.2.1.4 电枢

电枢是产生电磁转矩的核心部件，其结构如图 1.2-84 所示，主要由铁心、电枢绕组和换向器组成。

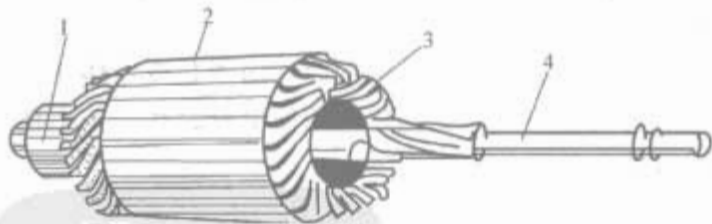


图 1.2-84 电枢

- 1—换向器；2—铁心；3—电枢绕组；4—电枢轴

电枢铁心是由许多相互绝缘的硅钢片叠装而成，其圆周表面上有槽，用来安放电枢绕组，电枢绕组用矩形截面的裸铜条绕制，绕线型式多采用波绕法。

3.2.1.5 换向器

换向器结构如图 1.2-85 所示，它由许多截面呈燕尾形的铜片围合而成，铜片 1 嵌在换向器轴套 2 和压环 3 组成的槽中，铜片之间以及铜片与轴套、压环之间均用云母绝缘。铜片

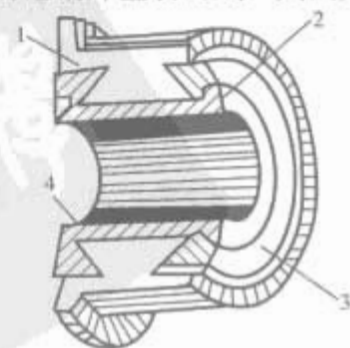


图 1.2-85 换向器剖面图
1—铜片；2—轴套；
3—压环；4—云母

一端有焊接电枢绕组线头的突缘。

换向器的作用是把通入电刷的直流电流,转换为电枢绕组中导体所需要的交变电流。

3.2.1.6 端盖

端盖有前、后两个。前端盖一般用钢板压制而成,其上装有4个电刷架,后端盖为灰铸铁浇铸而成。它们分别装在机壳的两端,靠两个长螺栓与起动机机壳紧固在一起。两端盖内均装有青铜石墨轴承套或铁基含油轴承套,以支承电枢轴。

3.2.2 工作原理

直流电动机是把电能变为机械能的设备,它是以通电导体在磁场中受电磁力作用这一原理为基础的。其工作原理如图1.2-86所示。

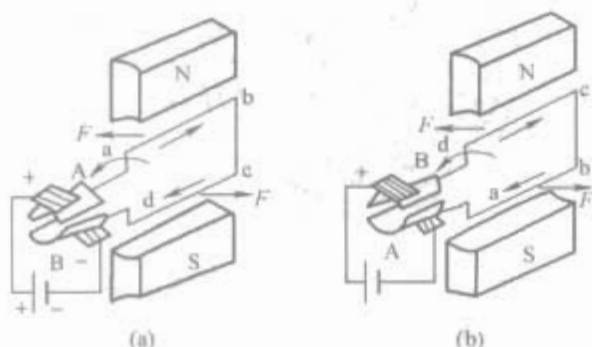


图 1.2-86 直流电动机的工作原理
(a) 电流方向 $a \rightarrow d$; (b) 电流方向 $d \rightarrow a$

将电动机的电刷与直流电源相接,电流由换向片A和正电刷流入,由换向片B和负电刷流出,此时绕组中的电流方向是由 $a \rightarrow d$,如图1.2-86(a)所示。载流导体在磁场中受到电磁力的作用,产生了电磁转矩,力的方向按左手定则判断,导线ab受到向左的电磁力 F ,导线cd受到向右的电磁力 F ,因此整个线圈受到逆时针方向的转矩而转动。当电枢转过半周时,正电刷接触换向片B,负电刷接触换向片A,绕组中的电流方向改变为 $d \rightarrow a$ [见图1.2-86(b)],因而N极和S极下的导线中的电流方向保持不变,电磁转矩方向也就不变,使电枢仍按原来的方向继续旋转。

由一个线圈所产生的转矩太小,转速也不稳定。实际上,电动机的电枢上绕有很多线圈,整流子片数随线圈的增多而相应增加。

3.2.3 转矩

当直流电动机接上直流电源时,由于载流导体在磁场中受到电磁力的作用,产生电磁转矩使电枢旋转。作用在电枢上每根导线上的平均电磁力 F_{av} 为

$$F_{av} = B_{av} IL \quad (1.2-45)$$

式中: B_{av} 为每一磁极下的平均磁感应强度; I 为导体中的电流; L 为导体的有效长度。

设电动机中有 $2p$ 个磁极 (p 为磁极对数),每个磁极的磁通为 Φ ,电枢的直径为 D ,则每一磁极下的电枢表面积为 $\pi DL / (2p)$,每一磁极下的平均磁感应强度则为

$$B_{av} = 2p\Phi / (\pi DL) \quad (1.2-46)$$

而

$$I = I_a / (2a) \quad (1.2-47)$$

式中: I_a 为电枢电流; a 为电枢绕组的支路对数,当采用波绕法时, $a=1$ 。

将式(1.2-46)、式(1.2-47)代入式(1.2-45),则有

$$F_{av} = pI_a\Phi / \pi aD \quad (1.2-48)$$

作用在电枢上的电磁转矩为

$$T = F_{av} DZ / 2 \quad (1.2-49)$$

式中: Z 为电枢导体总数。

将式(1.2-48)代入式(1.2-49)得

$$T = C_m I_a \Phi \quad (1.2-50)$$

式中: $C_m = pZ / (2\pi a)$ 决定于电动机的构造,对每一个电动机来说为一常数,故称为电机常数。

由此可知,电磁转矩的大小与电枢电流 I_a 及磁极的磁通 Φ 成正比。

3.2.4 工作过程

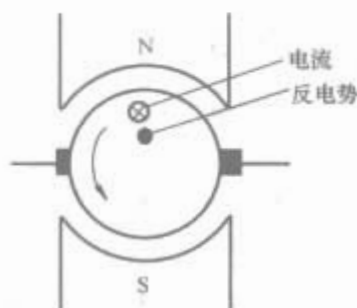


图 1.2-87 直流电动机的反电势

把直流电动机接入直流电源时,产生电磁转矩,使电枢旋转。电枢旋转时,电枢绕组又会切割磁力线产生感应电动势,其方向用右手定则来判断,恰好与电流方向相反,故称反电势。如图1.2-87所示,反电势为

$$E = C_1 \Phi n \quad (1.2-51)$$

因此,外加于电枢上的电压的一部分消耗在电枢绕组电阻 R_a 上,另一部分用来平衡电动机的反电势,即

$$U = E + I_a R_a \quad (1.2-52)$$

式(1.2-52)是电动机运转时必须满足的一个基本条件,称为电压平衡方程式。

由电压平衡方程式可知,电枢电流 I_a 可表示为

$$I_a = (U - E) / R_a = (U - C_1 \Phi n) / R_a \quad (1.2-53)$$

当电动机负载增加时,由于轴上的阻力矩增大,电枢转速就会降低,故 E 随之减小,使电枢电流 I_a 增大,电磁转矩也随之增大,一直到电动机的电磁转矩与阻力矩相等为止。这时,电动机将在新的负载下,以新的平衡转速运转。

可见,当负载发生变化时,电动机的转速、电流和转矩,就会自动作相应变化,以满足负载的需要。

3.3 起动机特性

3.3.1 直流串励电动机的特性

在直流电动机中,按磁场绕组与电枢绕组的连接方式的不同,可分为串励式、并励式和复励式三种。汽车用的起动机大多为串励式直流电动机,其特点有以下几方面。

3.3.1.1 起动转矩大

为了更深刻理解串励式直流电动机的特性,下面把它与并励式直流电动机进行比较。



图 1.2-88 并励式直流电动机电路

图1.2-88所示为并励式直流电动机的电路图,由于磁场绕组与电枢绕组并联,所以流过磁场绕组的磁电流 I_f 为

$$I_f = U / R_f \quad (1.2-54)$$

式中: U 为蓄电池电压; R_f 为磁场绕组的电阻。

由式(1.2-54)可知,当电源电压 U 和磁场绕组 R_f 不变时,由于 I_f 不变,则它所产生的磁通 Φ 也不变(忽略电枢反应的影响),即 $\Phi = \text{常数}$ 。由式(1.2-50)可知

$$T = C_m I_a \Phi = C' I_a \quad (1.2-55)$$

$C' = C_m \Phi$ 为一常数。

可见在并励式直流电动机中,由于磁通为一常数,所以

电磁转矩只与电枢电流成正比。

图 1.2-89 为串励电动机电路图，由于磁场绕组与电枢绕组串联，电枢电流 I_a 与磁场电流 I_f 相同，即 $I_a = I_f$ 。

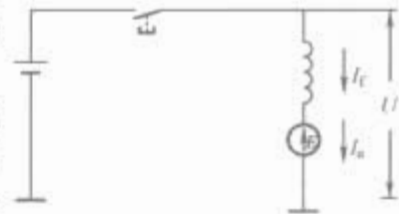


图 1.2-89 串励式直流电动机电路

在磁路未饱和时，由于磁通 Φ 与电枢电流 I_a 成正比，即 $\Phi = C_1 I_a$ ，所以电动机转矩

$$T = C_m I_a \Phi = C I_a^2 \tag{1.2-56}$$
$$C = C_m C_1$$

由式 (1.2-56) 可知，串励直流电动机的电磁转矩在磁路未饱和时与电枢电流的二次方成正比，只有在磁路饱和后， Φ 几乎不变，电磁转矩才与电枢电流成直线关系，如图 1.2-90 所示。这是串励电动机的一个重要特点。可见在电枢电流相同的情况下，串励电动机的转矩要比并励式大得多。

特别在起动的瞬间，由于发动机的阻力矩很大，起动机处于完全制动的情况下， $n=0$ ，故反电动势 $E=0$ 。此时电枢电流将达最大值（称为制动电流），产生最大扭矩（称为制动转矩），从而使发电机易于起动。这是起动机采用串励电动机的主要原因。

3.3.1.2 轻载转速高、重载转速低

在并激直流电动机中，根据式 (1.2-51) 和式 (1.2-52) 得

$$n = (U - I_a R_a) / (C_1 \Phi) \tag{1.2-57}$$

由于 Φ 为常数，而电枢电阻 R_a 又很小，所以当 I_a 增大（即转矩增大）时，电机转速下降不大，具有硬的机械特性，如图 1.2-91 所示。

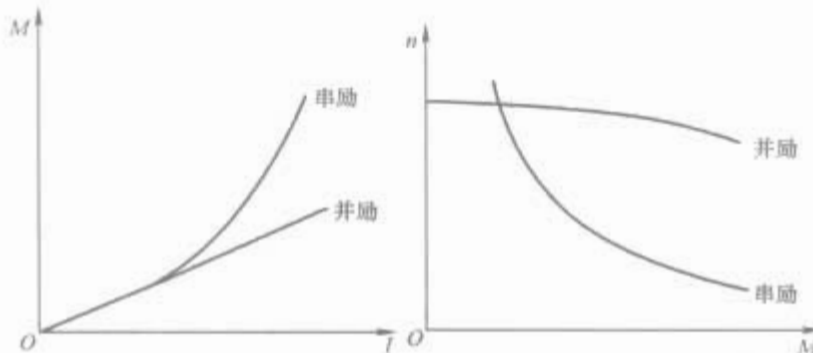


图 1.2-90 直流电动机的转矩特性

在串励式直流电动机中，其电压平衡方程式为

$$U = E + I_a (R_a + R_f) \tag{1.2-58}$$

则

$$n = [U - I_a (R_a + R_f)] / C_1 \Phi \tag{1.2-59}$$

在磁路未饱和时，由于 Φ 不是常数，所以当 I_a 增大，即转矩增大时，由于 Φ 和 $I_a (R_a + R_f)$ 的增大，其转速将显著下降，具有软的机械特性，如图 1.2-91 所示。

由于串励直流电动机具有软的机械特性，即轻载时转速高、重载时转速低，故对起动发动机十分有利。因为重载时转速低，可使起动安全可靠，这是起动机采用串激式的又一原因。

串励直流电动机在轻载时转速很高，易造成“飞车”事故。因此对于功率较大的串励直流电动机不允许在轻载或空载下运行。

3.3.2 起动机的特性曲线

起动机的转矩、转速、功率与电流的关系称为起动机的特性曲线。专用起动机的性能是以特性曲线的形式给出的，

图 1.2-92 所示为典型轻型汽车起动机的特性曲线。

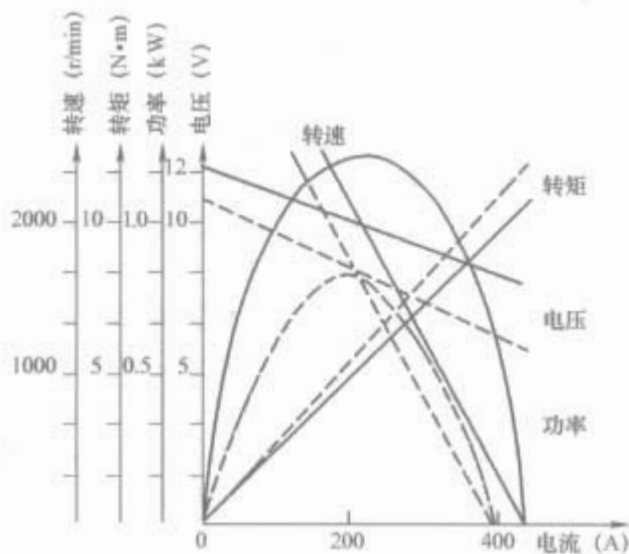


图 1.2-92 起动机的特性曲线

(12V/0.9kW，使用蓄电池容量为 55Ah/255A 的起动机)
——+20℃；---- -20℃

从图 1.2-92 中可以看出：

- (1) 当完全制动时，相当于刚接入起动机情况，此时 $n=0$ ，电流最大（称为制动电流），转矩也达最大值（称为制动转矩）。
- (2) 在起动机空转时，转速 n_0 达最大值，称为空转转速。此时电流 I_0 最小，称为空转电流。
- (3) 在电流接近制动电流的一半时，起动机的功率最大。值得注意的是：当负荷为 0 时，会出现极高的转速，使电动机极有可能损坏。无负荷时，作用在电枢上的巨大离心力也会损坏绕组。

生产中常通过空转和全制动两项试验来检验起动机的工作是否正常。

3.3.3 起动机的功率及其影响因素

起动机的功率 P 可由测量电枢轴上的扭矩 M 和电枢的转速 n 来确定。

$$P = Mn / 9546.3 \quad (\text{kW}) \tag{1.2-60}$$

因此在完全制动 ($n=0$) 和空载 ($M=0$) 时起动机的功率等于零。当电流约为制动电流的一半时，起动机能发出最大功率。由于起动机运转时间很短，允许它以最大功率运转，所以把起动机的最大输出功率称为起动机的额定功率。

影响起动机功率的主要因素：

- (1) 接触电阻和导线电阻的影响。电刷与换向器接触不良、电刷弹簧张力减弱以及导线与蓄电池接线段连接不紧，都会使电阻增加，导线过长及截面积过小也会造成较大的电压降，使起动机功率减小。因此必须保证电刷与换向器接触良好，导线接头紧固，同时，应尽可能缩短蓄电池接至起动机的导线以及蓄电池搭铁线的长度，并应选用截面积足够大的导线，以保证起动机的正常工作。
- (2) 蓄电池容量的影响。蓄电池容量越小，则其内阻越大，内压降也越大，因而供给起动机的电压降低，也会使起动机功率减小。
- (3) 温度的影响。当温度降低时，由于蓄电池电解液黏度增大，内阻增加，会使蓄电池容量和端电压剧烈下降，起动机功率将显著降低，因此冬季时应应对蓄电池采取有效的保温措施。

3.4 起动机基本数据的确定

在选择起动机时，必须确定的基本参数有起动机的功

率、起动机与发动机曲轴的传动比以及蓄电池的容量。

3.4.1 功率的选择

为了使发动机能迅速、可靠地起动，起动机必须具有足够的功率。如起动机功率不够，就会使重复起动的次数增多，起动时间延长，这不仅对蓄电池不利，并且对燃料的消耗、零件的磨损以及车辆的工作都是极其不利的。

起动发动机所必需的功率，决定于发动机的最低起动转速和发动机的起动阻力矩，并可按式（1.2-60）计算。

所谓发动机的最低起动转速是指保证发动机可靠起动的曲轴的最低转速。对于汽油机来说，要使它可靠起动，需要三个条件：①气缸中吸入可能着火的混合气；②压缩行程终了时，混合气要具有一定的温度和压力，使第一次爆发后发动机能继续工作；③点火装置能发出可靠的火花。

上述条件都直接与曲轴的转速有关，其中条件①对转速的要求起着决定作用。因为转速过低时，进气管中气流流速过低，使汽油雾化不良，且压缩行程中的热量损失过多，导致气缸内混合气不易着火。因此根据汽化条件，汽油机在0~20℃时其最小起动转速一般为35~40r/min。为了在更低的温度下顺利起动，常取最低起动转速为50~70r/min。

柴油机靠压缩点火，而压缩行程终了的空气温度则取决于周围介质的温度、气缸壁的温度和压缩时间的长短。转速低时由于压缩时间长，散热、漏气增加，就会使压缩行程终了时的空气温度降低，使燃料不易点燃，因此柴油机的最低起动转速比汽油机要高，其值随发动机的型式和起动时的温度而不同，一般为100~200r/min。

有关发动机的最低起动转速见表1.2-14。

发动机起动阻力矩是指在最低起动转速时发动机的阻力矩。发动机阻力矩包括三部分：

（1）摩擦阻力矩。主要由活塞与气缸壁的摩擦以及曲轴轴承的摩擦所决定，另外还决定于润滑油的黏度。如在0~5℃时，摩擦阻力矩占全部阻力矩的60%；在-10~-20℃时，由于润滑油黏度增大，摩擦阻力矩也相应增大，可占全部阻力矩的80%~95%。

（2）压缩损失力矩。它主要决定于气缸容积和压缩比的大小。气缸容积和压缩比愈大，则压缩损失力矩愈大，一般约占全部阻力矩的25%。

（3）驱动发动机辅助机构的驱动阻力矩。在温度近于0℃时，汽油机消耗在驱动发电机、分电盘、汽油泵、机油泵和水泵等辅助机构的阻力矩约占全部阻力矩的15%。

由上述可知，发动机的阻力矩主要取决于气缸的工作容积、缸数（不同缸数发动机所需的起动转矩见表1.2-15）、压缩比、转速和温度。柴油机的阻力矩比汽油机几乎大一倍，这是因为柴油机的压缩比高，且驱动燃油泵等辅助机构的功率也较大。各型发动机的阻力矩应由实验方法决定，也可用下列经验公式求得。

0℃时发动机的阻力矩为

$$M = CV \tag{1.2-61}$$

式中：V为发动机的工作容积，L；C为不同发动机的系数，参见表1.2-16。

表 1.2-16 不同发动机的阻力矩系数			
发动机 \ 表缸数	C		
	4	6	8
汽油机, 压缩比为 5	3	3.5	3.8
汽油机, 压缩比为 7	3.5	4	4.2
柴油机, 压缩比为 15	7	7.2	7.4

因此起动发动机所必需的功率，对汽油机为

$$P = (0.18 \sim 0.22)V \text{ (kW)} \tag{1.2-62}$$

对于柴油机为

$$P = (0.74 \sim 1.1)V \text{ (kW)} \tag{1.2-63}$$

对大型多缸柴油机来说，由于各缸的压缩阻力矩互相迭合，驱动机构所消耗的功率相对减小，且气缸直径增大时，散热减慢使起动转速降低，则所需的起动机功率相对减小。如功率超过110kW的柴油机，起动功率只为(0.5~0.6)V即可满足要求。

3.4.2 传动比的选择

如起动机与发动机之间的传动比选择不当，则起动机的功率不能充分利用，发动机仍会起动困难。因此，必须正确选择传动比，以使起动机在发动机最低起动转速时能发出本身的最大功率。

3.4.2.1 最佳传动比的确定

为了说明最佳传动比，现将2201型起动机5种不同传动比的机械特性曲线折算到曲轴上并与发动机的阻力矩曲线同画在一个图中，如图1.2-93所示。这些曲线的交点即代表了采用不同传动比时发动机和起动机的运行情况。如传动比*i*=12.8时，两个曲线的交点为A，这时曲轴的转速为47r/min，将这个转速再换算为起动机的转速则为47×12.8=593.6r/min。根据这个转速可在2201型起动机特性曲线（见图1.2-94）的转矩曲线上找到相应的A点，通过A点作垂直于横坐标的虚线，即表示该传动比下起动机的工作情况。这时，起动机的工作电流为340A，起动机功率为0.8kW。而当传动比*i*=20时，起动机工作在B点，发动机的转速为55r/min，起动机的转速为1100r/min，起动机的工作电流为270A，而功率却最大。两者相比，*i*=20时为好。

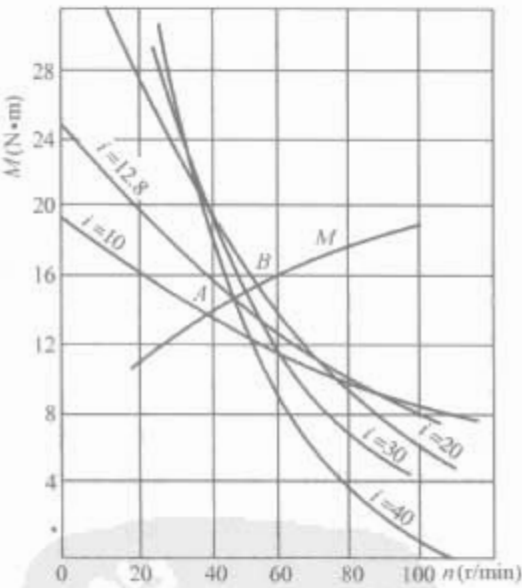


图 1.2-93 不同传动比时发动机转速

由此可见，选择传动比时应使起动机工作在最大功率，此时最为有利，即最佳传动比是与起动机的最大功率相对应的。

3.4.2.2 传动比的实际选择

在实际工作中，传动比选的往往比最佳值稍小，这时虽然起动机的工作电流有所增大、功率减小了一些，但起动机的转矩却增大较多，对起动有利。

另外还需说明，传动比的选择要受飞轮齿环和起动机驱动齿轮的限制。这是因为

$$i = Z_2/Z_1 \tag{1.2-64}$$

式中：Z₂为飞轮齿环的齿数；Z₁为起动机驱动齿轮的齿数。

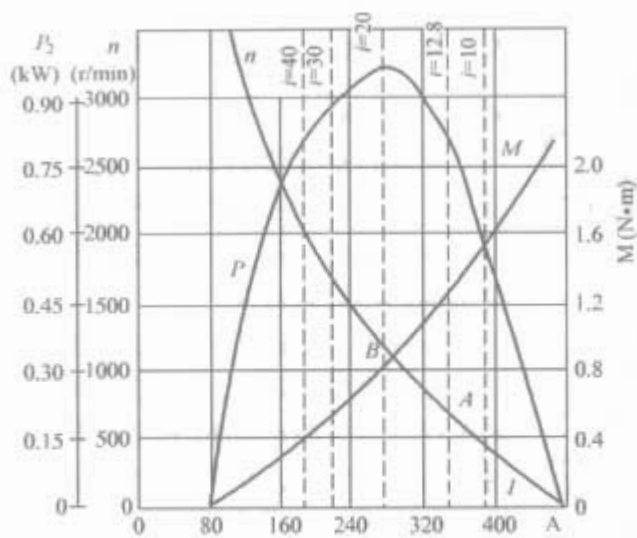


图 1.2-94 2201 型起动机特性曲线
(温度-10℃, 蓄电池为 2×3-Q-90)

$$Z = D/m \tag{1.2-65}$$

式中： D 为飞轮齿环的节圆直径； m 为齿轮模数。

因模数 m 由强度决定，不能任意减小，飞轮齿环的节圆直径 D 由发动机总布置决定， Z 不能任意增大，而起动机驱动齿轮的齿数 Z_1 受根切的限制，齿数的减少也是有限的，故通常起动机驱动齿轮一般为 9~13（个别情况有 5~7 的）。在汽油机中，起动机与曲轴的传动比一般为 13~17，柴油机因起动转速较高，传动比较小，一般为 8~10。

3.4.2.3 蓄电池容量的确定

起动机功率确定后，即可确定蓄电池的容量为

$$Z = (600 \sim 800)P/U \tag{1.2-66}$$

式中： P 为起动机额定功率，kW； U 为起动机额定电压，V。

对于大功率的起动机（7.5kW 以上），蓄电池的容量可比计算值小些。

3.5 起动机传动机构

起动机传动机构实际上是一个单向离合器。单向离合器的作用是单方向传递转矩，即起动发动机时将起动机转矩传给发动机曲轴，而当发动机起动后，它又能自动打滑，不使飞轮齿环带动起动机电枢旋转，以免损坏起动机。因为飞轮齿环与起动机驱动齿轮的传动比为 1:10~1:15，发动机发动后，如果不及时将起动机与发动机分离，则起动机电枢就会被发动机曲轴带动，以 10000~15000r/min 的高速旋转，导致电枢线圈从电枢槽中甩出，造成“飞散”事故，而使电枢损坏。单向离合器有滚柱式、摩擦片式、弹簧式、棘轮式等不同形式。

3.5.1 滚柱式单向离合器

滚柱式单向离合器是国内外汽车起动机使用最多的一种，东风牌、解放牌汽车均采用这种形式。结构如图 1.2-95 所示。驱动齿轮 1 与外壳 2 连成一体，外壳内装有十字块 3

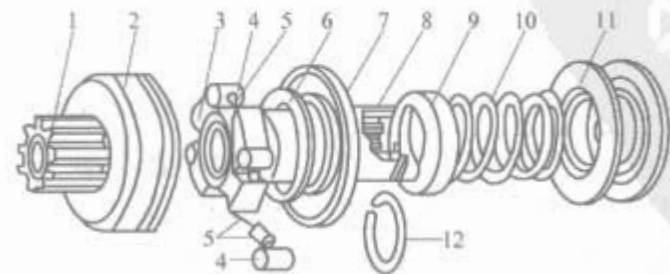


图 1.2-95 滚柱式单向离合器结构
1—起动机驱动齿轮；2—外壳；3—十字块；4—滚柱；
5—压帽与弹簧；6—垫圈；7—护盖；8—传动套筒；
9—弹簧座；10—缓冲弹簧；11—移动衬套；12—卡簧

和四套滚柱 4、压帽和弹簧 5，十字块与传动套筒 8 固连，护盖 7 与外壳相互扣合密封。传动套筒的外面套有缓冲弹簧与移动衬套 11，并由卡簧制止其脱出。整个总成利用传动套筒套在起动机轴的花键部位上，可以做轴向移动和随轴转动。

滚柱式单向离合器工作原理如图 1.2-96 所示。它的外壳与十字块之间的间隙是宽窄不等的（呈楔形的槽）。发动机起动时，由拨叉拨动传动套筒，将单向离合器沿花键推出，使驱动齿轮啮入飞轮齿环。当起动机电枢旋转时，转矩由传动套筒传到十字块，十字块则随电枢一同旋转，这时滚柱 4 便滚入楔形槽的窄处被卡死，于是转矩传给驱动齿轮，带动飞轮使发动机起动 [见图 1.2-96 (a)]。当发动机起动后，曲轴转速增高，飞轮齿环带动驱动齿轮旋转，速度大于十字块时，滚柱滚入楔形槽的宽处而打滑 [见图 1.2-96 (b)]。这样转矩就不能从驱动齿轮传给起动机电枢，从而防止了电枢超速飞散的危险。

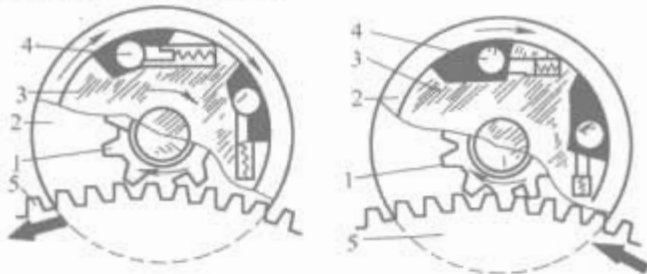


图 1.2-96 滚柱式单向离合器工作示意
1—驱动齿轮；2—外壳；3—十字块；
4—滚柱；5—飞轮

滚柱式单向离合器结构简单，坚固耐用、工作可靠，但在传递较大转矩时容易卡住。故只在中、小功率的起动机中广泛应用，而不能用于大功率起动机。

3.5.2 摩擦片式单向离合器

大功率的起动机上多采用摩擦片式单向离合器，它是通过摩擦片的压紧和放松来实现离合的。其内部结构与工作原理如图 1.2-97 所示。

摩擦片式单向离合器的外接合鼓 1 固定在起动机轴上，两个弹性圈 2 和压环 3 依次沿起动机轴装进外接合鼓中，青铜的主动片 4 以其外凸齿装入外接合鼓的切槽中，钢制的被动片 5 以其内齿插入内接合鼓 6 的切槽中。内接合鼓具有螺旋线并旋在起动机驱动齿轮柄 9 的三线螺纹上，齿轮柄则自由地套在起动机轴上，内垫有减震弹簧 8，并用螺母锁着以免从轴上脱落。内接合鼓 6 上具有两个小弹簧 7，轻压堵片，以保证它们彼此接触。其工作原理如下：当起动机带动曲轴旋转时，内接合鼓沿螺旋线向右移动，将摩擦片压紧 [见图 1.2-97 (b)]，利用摩擦力使电枢的转矩传给飞轮。发动机发动后，起动机驱动齿轮被飞轮带动，当其转速超过电枢转速时，内接合鼓则沿着螺旋线向左退出，摩擦片松开 [见图 1.2-97 (c)]，这时驱动齿轮虽高速旋转，但不驱动电枢，从而避免了电枢超速飞散的危险。

装配弹性圈 2 的目的是为了保护反击。弹性圈的中央部分靠在外接合鼓 1 的凸起上，而周缘与压环 3 接触。当起动机传递转矩时，它在压环凸缘的压力下稍弯曲。如果发动机发生反击，这时离合器中摩擦片仍保持被压紧状态，弹性圈则弯曲到使内接合鼓 6 的右端顶住它的中央部分，这就限制了内接合鼓向右的位移，因而限制了摩擦片的压紧程度，摩擦片开始打滑。从而起到了保护反击的作用。

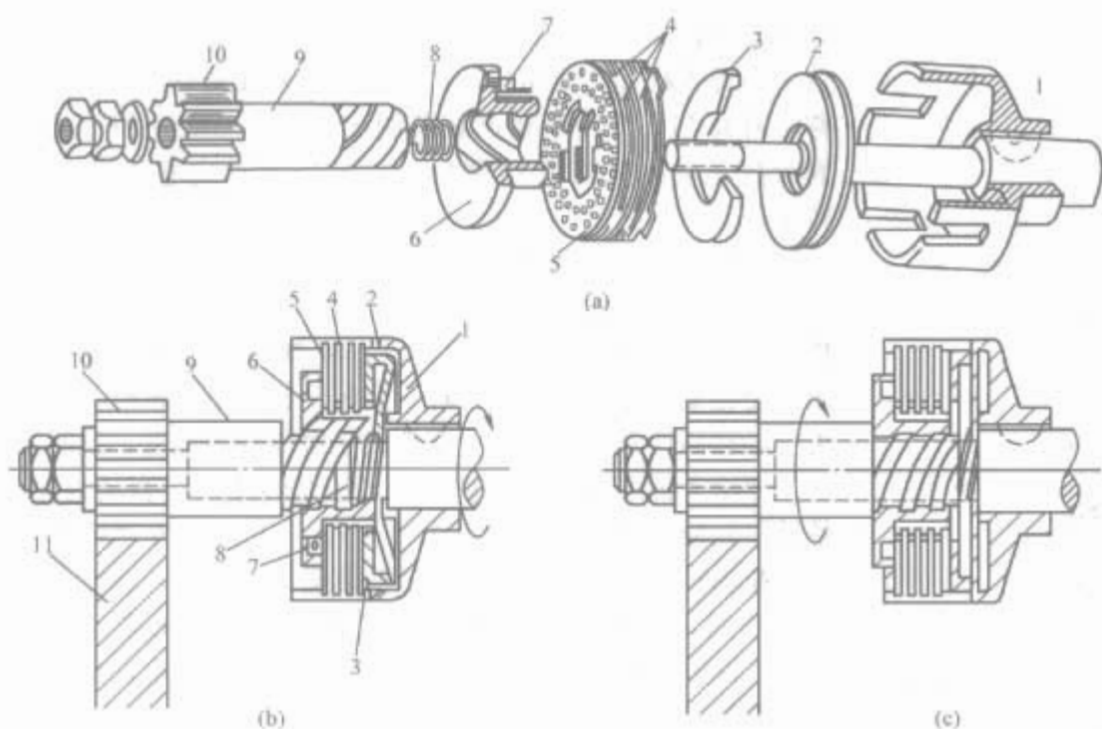


图 1.2-97 摩擦片式单向离合器

(a) 离合器; (b) 压紧; (c) 放松

1—外接合鼓; 2—弹性圈; 3—压环; 4—主动片; 5—被动片; 6—内接合鼓;
7—小弹簧; 8—减振弹簧; 9—齿轮柄; 10—驱动齿轮; 11—飞轮

摩擦片式单向离合器所传递的最大转矩是由于内接合鼓 6 顶住弹性圈而被限制的, 因此在压环与摩擦片之间加薄垫片即可调整最大转矩。

摩擦片式单向离合器能传递较大转矩, 但摩擦片磨损后, 摩擦力会大大降低, 故需经常调整。

3.5.3 弹簧式单向离合器

国产黄河牌汽车以及日本五十铃 TX50 型汽车的起动机采用这种型式。弹簧式单向离合器的结构如图 1.2-98 所示。起动机驱动齿轮, 套在起动机电枢轴的光滑部分上, 连接套筒 6 套在电枢轴的螺旋花键上, 两者之间由两个月形圈 3 连接。月形圈的作用是使驱动齿轮与连接套筒之间不能作轴向移动, 但可相对转动。在驱动齿轮柄和连接套筒 6 上包有扭力弹簧 4, 扭力弹簧的两端各有 1/4 圈内径较小, 并分别箍紧在齿轮柄和连接套筒上。当起动机带动曲轴旋转时, 扭力弹簧扭紧, 包紧齿轮柄与连接套筒, 于是电枢的扭矩通过扭力弹簧 4、驱动齿轮 1 传至飞轮齿环, 使发动机起动。发动机起动后, 驱动齿轮的转速高于起动机电枢, 则扭力弹簧放松, 这样飞轮齿环的扭力便不能传给电枢, 即驱动齿轮 1 只能在电枢轴的光滑部分上空转而起单向离合器的作用。

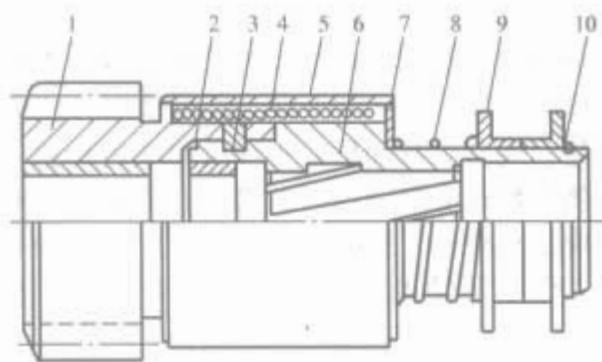


图 1.2-98 弹簧式单向离合器

1—驱动齿轮; 2—挡圈; 3—月形圈; 4—扭力弹簧; 5—护圈;
6—连接套筒; 7—垫圈; 8—缓冲弹簧; 9—移动衬套; 10—卡簧

弹簧式单向离合器的优点是结构简单、工艺简化、寿命长、成本低, 但扭力弹簧圈数多, 轴向尺寸较长, 不能在小型起动机上装用。

3.6 起动机的分类与型号

3.6.1 分类

起动机的主要组成中, 电动机一般没有多大差别, 而控制部分和传动机构却各不相同。因此, 起动机多按控制方法和传动机构的不同来分类。

按控制方法的不同, 起动机可分为:

(1) 机械控制。由脚踏或手拉杠杆联动机构直接控制起动机的主电路开关来接通或切断主电路。解放 CA10B 型汽车即采用这种方式。这种方式虽然结构简单、工作可靠, 但由于要求起动机、蓄电池靠近驾驶室, 而受安装布局的限制, 且操作不便, 因此已很少采用。

(2) 电磁控制。由按钮或钥匙控制电磁铁, 再由电磁铁控制主电路开关, 以接通或切断主电路。由于装有电磁铁, 可进行远距离控制, 操作省力, 现代汽车大都采用这种方式。

按传动机构啮入方式, 起动机可分为:

(1) 惯性啮合式。起动机旋转时, 驱动齿轮借惯性力自动啮入飞轮齿环。

(2) 强制啮合式。靠人力或电磁力拉动杠杆, 强制拨动驱动齿轮啮入飞轮齿环。

(3) 电枢移动式。靠磁极磁通的电磁力, 使电枢轴向移动, 将驱动齿轮啮入飞轮齿环。

(4) 齿轮移动式。靠电磁开关推动安装在电枢轴孔内的啮合杆, 而使驱动齿轮啮入飞轮齿环。

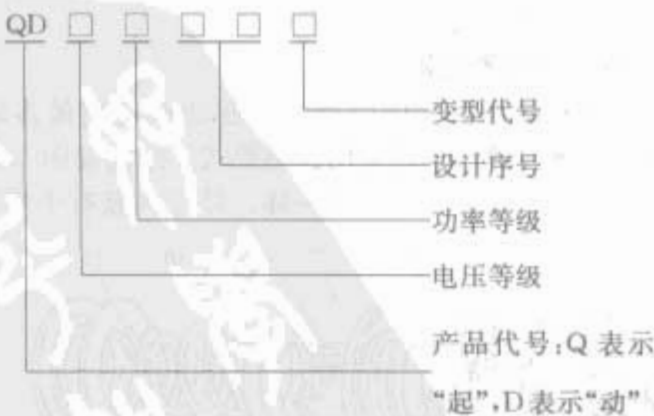
(5) 同轴式起动机。靠与起动机同轴安装的电磁开关直接吸动驱动齿轮与飞轮齿环啮合。

惯性啮合式起动机结构简单, 但不能传递较大的扭矩, 且工作可靠性较差, 现已很少采用。电枢移动式、齿轮移动式起动机在东欧国家广泛使用, 但其结构较复杂。强制啮合式起动机由于工作可靠而被广泛采用。

除上述以外, 还有磁极为永久磁铁的永磁起动机, 以及内装减速齿轮的减速起动机。

3.6.2 型号

根据 QC/T 73—1993《汽车电气设备产品型号编制方法》的规定, 汽车起动机型号的编制方法如下:



QDJ 表示减速起动机, QDY 表示永磁起动机 (包括永磁减速起动机), J、Y 分别表示“减”、“永”。

电压等级: 1—12V; 2—24V。

功率等级: 含义见表 1.2-17。

如 QD124, 表示额定电压为 12V、功率为 1~2kW、第四次设计的起动机。

表 1.2-17 起动机的功率等级代号									
功率等级代号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
功率 (kW)									
起动机									
减速起动机	~1	>1~2	>2~3	>3~4	>4~5	>5~6	>6~7	>7~8	>8
永磁起动机									

3.7 强制啮合式起动机

强制啮合式起动机按控制方法的不同分为两类：

(1) 机械啮合式起动机。它是指用机械方法（如脚踏），通过拨叉把驱动齿轮推出与发动机飞轮齿环啮合的起动机。解放 CA10B、跃进 NJ130 所用的起动机即为这种型式。这种型式的起动机因操作不便已被淘汰。

(2) 电磁啮合式起动机。它是用电磁开关控制，通过拨叉推动驱动齿轮与飞轮齿环啮合，并使起动机主电路接通。国产汽车的起动机大都采用这种型式。

3.7.1 ST614 型电磁控制强制啮合式起动机

黄河 JN150 型汽车装的起动机就是 ST614 型起动机，其电磁开关的结构如图 1.2-99 所示。在黄铜套 11 上绕有吸

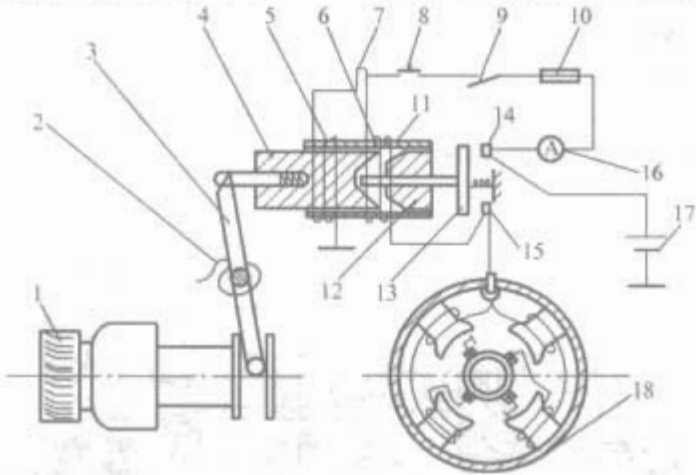


图 1.2-99 ST614 型起动机电路图

引线圈 6 和保持线圈 5，两个线圈的绕向相同，其公共端接至起动按钮。吸引线圈的另一端接至起动机开关，与起动机的主电路串联，保持线圈的另一端则搭铁。黄铜套内装有活动铁心 4，它与拨叉相连接，挡铁 12 的中心装有杆，其上套有铜质接触盘 13。

工作原理：接通起动机总开关 9，按下起动按钮 8，则吸引线圈和保持线圈的电路接通。其电路为：蓄电池正极→接线柱 14→电流表 16→熔断丝 10→起动总开关 9→起动按钮 8→接线柱 7

保持线圈 5→搭铁→蓄电池负极

吸引线圈 6→接线柱 15→起动机磁场绕组→电枢绕组→搭铁→蓄电池负极

在两线圈电磁吸力的共同作用下，活动铁心 4 克服复位弹簧 2 的弹力而被吸入。拨叉便将齿轮 1 推出，使其与飞轮齿环啮合。当齿轮啮入后，接触盘 13 也将触头 14 和 15 接通，蓄电池电流便流经起动机磁场

绕组、电枢绕组，使起动机发出正常转矩转动曲轴。与此同时吸引线圈则被短路，活动铁心靠保持线圈的磁力保持在吸合位置。此时单向离合器传递转矩，使发动机起动。

发动机起动后，单向离合器开始打滑，保护电枢不会超速而损坏。此时松开起动按钮，电流经接触盘、吸引线圈和保持线圈构成回路。由于此时两线圈所产生的磁通方向相反而互相抵消，于是活动铁心在复位弹簧的作用下回至原位，使驱动齿轮退出，接触盘回位，切断了起动机电路，起动机便停止转动。

3.7.2 QD124 型电磁控制强制啮合式起动机

QD124 型起动机装于东风 EQ1090 型载货汽车上，其结构如图 1.2-100 所示。它与 ST614 型起动机一样，都具有电磁开关，其不同之处是其单向离合器为滚柱式，且电路中又增加了一个起动继电器。起动机的电路如图 1.2-101 所示。

起动继电器的作用是用来接通电磁开关线圈的电路，借以保护点火开关。因为如直接用点火开关控制电磁开关线圈的电路，则起动时通过点火开关的电流很大（一般为 35A~40A），会使点火开关很快损坏。起动继电器为一动合型电磁继电器，其铁心上的线圈一端搭铁，另一端接起动机火线接线柱 4，由点火开关控制（见图 1.2-101）。

起动时，将点火开关 3 转到起动位置，起动继电器电路接通，电流从蓄电池正极→起动机开关接线柱 4→电流表→点火开关 3→起动继电器点火开关接线柱→线圈 2→搭铁→蓄电池负极。电流通过起动继电器线圈 2，使铁心磁化，吸下触点臂，于是触点 1 闭合，接通了电磁开关中吸引线圈和保持线圈的电路。其电流回路为：

蓄电池正极→起动机开关接线柱 4→起动继电器“电

池”接线柱、支架、触点 1、“起动机”接线柱→起动机接线柱 9

保持线圈 14→搭铁→蓄电池负极

吸引线圈 13→接线柱 8→导电片 7→起动机开关接线柱→起动机磁场绕组、电枢绕组→搭铁→蓄电池负极

在吸引线圈、保持线圈磁力的共同作用下活动铁心 15 被吸入，带动拨叉拨动驱动齿轮与飞轮齿环啮合。当驱动齿轮与飞轮齿环接近完全啮合时，活动铁心 15 推动接触盘的推杆 11 使接触盘 10 将起动机的主电路接通，起动机便以正

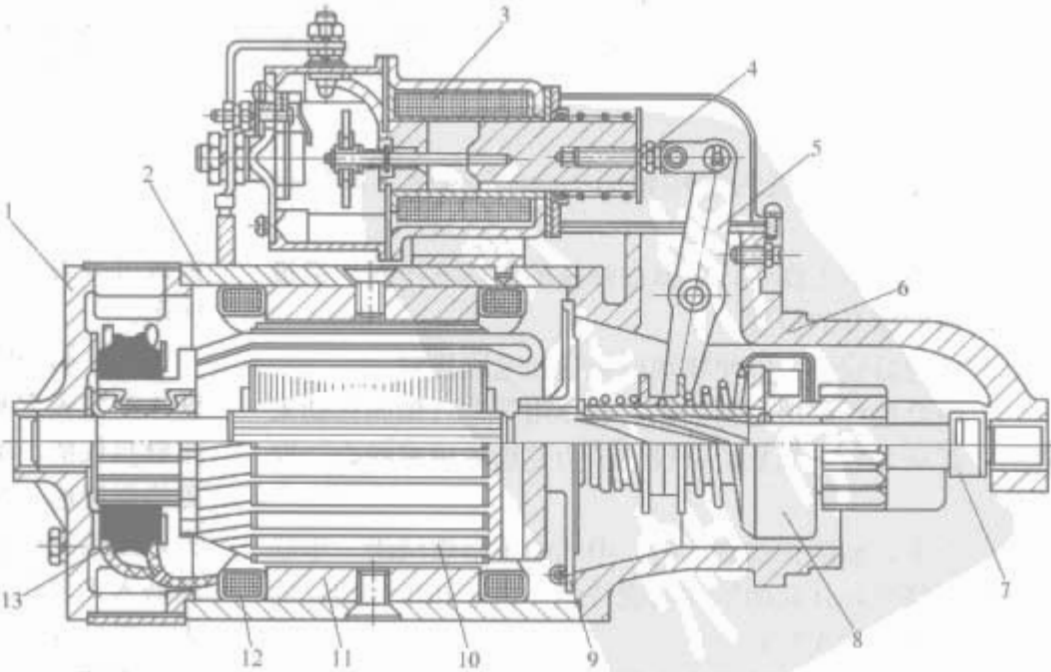


图 1.2-100 QD124 型起动机结构

1—前铺盖；2—机壳；3—电磁开关；4—调节螺钉；5—拨叉；6—后端盖；7—限位螺钉；8—单向离合器；9—中盖；10—电枢；11—磁极；12—磁场绕组；13—电刷

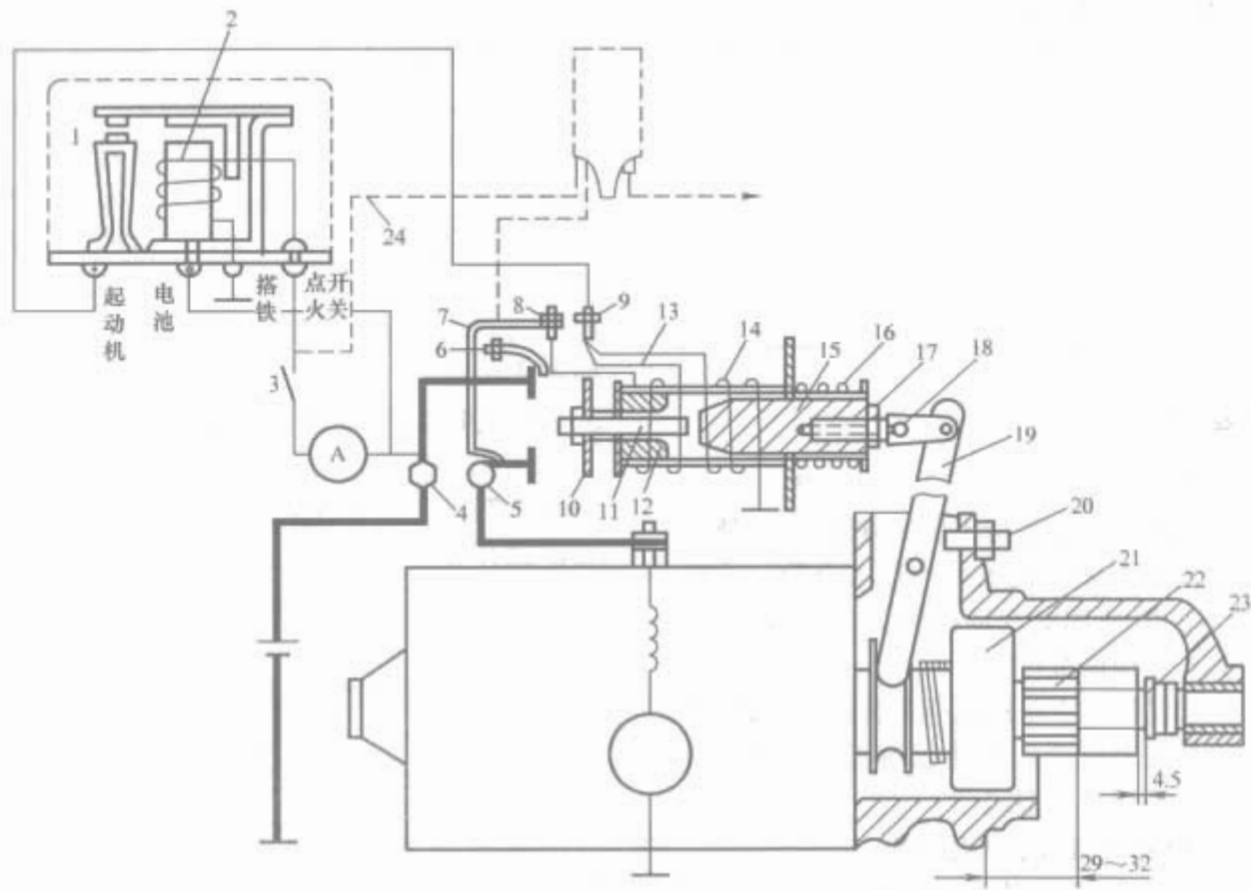


图 1.2-101 QD124 型起动机电路图

- 1—起动点火线圈；2—起动继电器线圈；3—点火开关；4、5—起动机开关接线柱；6—点火线圈附加电阻短路接线柱；7—导电片；
8—接线柱；9—起动机接线柱；10—接触盘；11—推杆；12—固定铁心；13—吸引线圈；14—保持线圈；
15—活动铁心；16—复位弹簧；17—调节螺钉；18—连接片；19—拨叉；20—定位螺钉；21—滚柱式单向离合器；
22—驱动齿轮；23—限位螺母；24—附加电阻线（1.7Ω 白线）

常转速起动发动机。主电路接通时，吸引线圈 13 被短路，活动铁心靠保持线圈 14 的磁力保持在吸合位置。

发动机起动后，放松点火开关旋钮，点火开关会自动转回一个角度，切断起动继电器线圈的电路，使触点 1 立即断开。触点 1 断开后，保持线圈中的电流由起动机开关接线柱 4、接触盘 10、接线柱 5、导电片 7、接线柱 8、吸引线圈 13 构成回路。此时两线圈所建立的磁场方向相反，相互抵消，于是活动铁心在复位弹簧的作用下退回原位，驱动齿轮与飞轮齿环脱离啮合，同时接触盘退出，切断了起动机与蓄电池之间的电路，起动机便停止工作。

3.8 电枢移动式起动机

电枢移动式起动机是利用磁极磁通的电磁力，移动整个电枢而使起动机驱动齿轮啮入飞轮齿环的。大功率柴油车上，多用电枢移动式起动机。

3.8.1 构造

电枢移动式起动机的结构如图 1.2-102 所示，其特点如下：

- (1) 起动机不工作时，电枢在弹簧的作用下停在与磁极中心轴向靠前错开的位置上。
- (2) 换向器较长，以便移动后仍能 and 电刷接触。
- (3) 啮合过程是由电枢在磁场的作用下进行轴向移动来实现的。起动之后，靠复位弹簧的拉力使齿轮脱离啮合，回至原位。
- (4) 有主、辅两种励磁绕组。串联的主励磁绕组、串联的辅助励磁绕组和并联的辅助励磁绕组。由于扣爪和挡片的作用，辅助绕组首先接通。
- (5) 采用单向摩擦片式离合器。

3.8.2 工作原理

电枢移动式起动机工作原理如图 1.2-103 所示，其过程

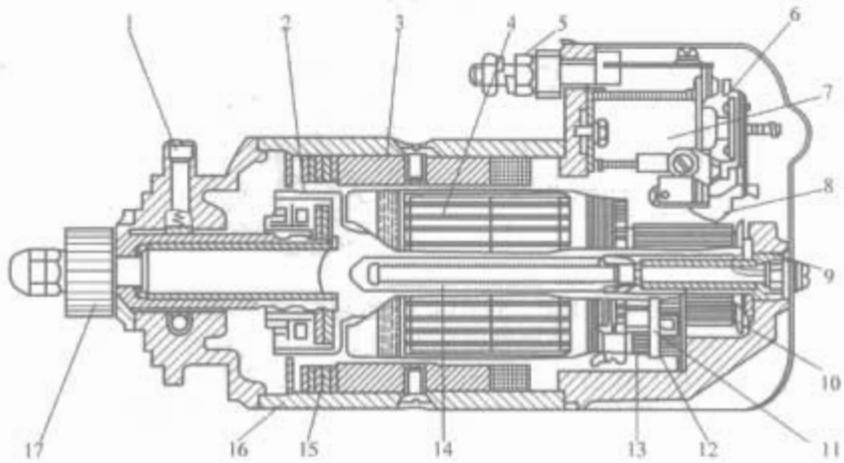


图 1.2-102 电枢移动式起动机

- 1—油塞；2—摩擦片式单向离合器；3—磁极；4—电枢；
5—接线柱；6—接触桥；7—电磁开关；8—扣爪；
9—换向器；10—圆盘；11—电刷弹簧；12—电刷；
13—电刷架；14—复位弹簧；15—磁场绕组；
16—机壳；17—驱动齿轮

大致可分为三个阶段。起动机不工作时，如图 1.2-103（a）所示。

(1) 第一阶段：啮入。起动时，按下起动按钮 S，电磁铁 4 产生吸力吸引接触盘 6，但由于扣爪 8 顶住了挡片 7，接触盘仅能上端闭合，如图 1.2-103（b）所示。此时辅助励磁绕组接通，并联辅助绕组 3 和串联励磁绕组 2 产生的电磁力，克服复位弹簧的拉力，吸引电枢向后移动，使起动机齿轮啮入飞轮齿环。由于辅助励磁绕组用细铜线绕制，电阻大，流过的电流很小，起动机仅以较低的速度旋转，使齿轮啮入柔和。

(2) 第二阶段：起动。当电枢移动使小齿轮与飞轮完全啮合后，固定在换向器端面的圆盘 10 顶起扣爪 8，使挡片 7

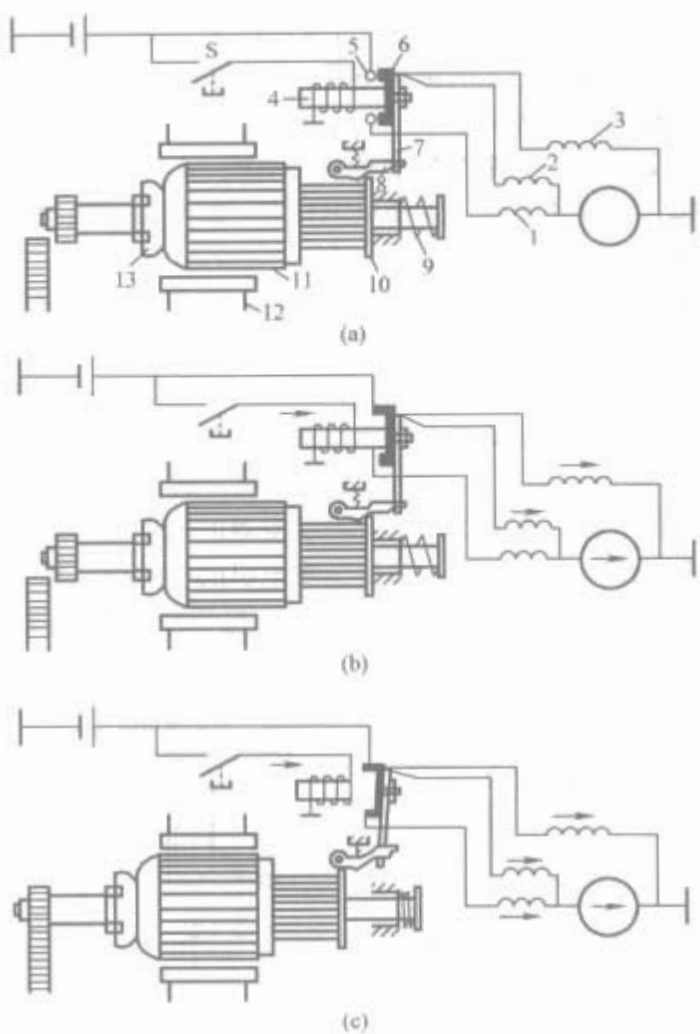


图 1.2-103 电枢移动式起动机工作原理简图

(a) 未啮合；(b) 进入啮合；(c) 完全啮合

- 1—主磁场绕组；2—串联辅助磁场绕组；3—并联辅助磁场绕组；
4—电磁铁；5—静触点；6—接触桥；7—挡片；
8—扣爪；9—复位弹簧；10—圆盘；11—电枢；
12—磁极；13—摩擦片离合器

脱扣，于是接触盘 6 的下端也闭合，接通主激磁绕组 1 的电路，起动机便以正常的转矩工作，起动发动机。在起动过程中，摩擦片离合器 13 压紧并传递扭矩，如图 1.2-103 (c) 所示。

(3) 第三阶段：脱开。发动机发动后，驱动齿轮转速大增，摩擦片离合器被旋松，曲轴转矩便不能传到电枢上，起动机处于空载状态。起动机因空载而转速增高，电枢中反电动势增大，串联辅助绕组 2 中的电流减小，当电流小到磁力不能克服复位弹簧的拉力时，电枢又移回原位，驱动齿轮与飞轮齿环脱开，扣爪也回到锁止位置。直到松开起动按钮，起动机才停止运转。

3.9 减速式起动机

为了提高起动性能并减轻起动机的重量，近年来又研制了一种内装减速齿轮的起动机，称为减速起动机。

减速起动机基本结构与电磁强制啮合式起动机相同，只是在电枢和起动齿轮之间装有一对减速齿轮，传动比一般为 3~4，如图 1.2-104 所示。经减速齿轮将起动机转速降低后，再带动驱动齿轮。由于应用了减速齿轮，可采用小型、高速低转矩的电动机，其转速高达 1500~2000r/min，因此使起动机的重量减少约 35%，总长度约缩短 29%，转矩增高。这不仅提高了起动性能，而且也相对减轻了蓄电池的负担。

在电枢轴端，有主动齿轮 13 与内齿圈 12 相啮合，内啮合齿轮与螺旋花键轴固连，螺旋花键轴上，套有滚柱式单向离合器 10。

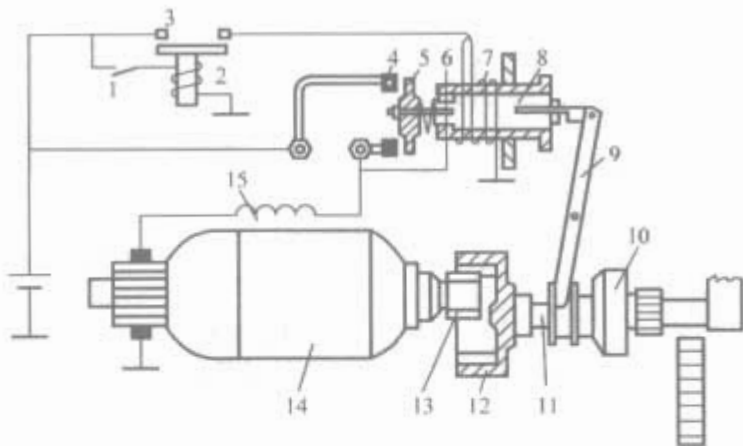


图 1.2-104 减速起动机

- 1—起动开关；2—起动继电器磁化线圈；3—起动继电器触点；
4—主触点；5—接触盘；6—吸引线圈；7—保持线圈；
8—活动铁心；9—拨叉；10—单向离合器；11—螺旋花键轴；
12—内啮合减速齿轮；13—主动齿轮；14—电枢；15—磁场绕组

当接通起动开关 1，蓄电池电流流过起动继电器磁化线圈 2，起动继电器磁化线圈产生吸力，使触点 3 闭合，接通电磁开关中吸引线圈 6 和保持线圈 7 的电路。

在两线圈电磁吸力的共同作用下，活动铁心 8 被吸入。带动拨叉 9 将单向离合器 10 推出，使驱动齿轮与飞轮齿环啮合。当驱动齿轮与飞轮完全啮合时，活动铁心推动接触盘 5，将触点 4 接通，起动机主电路接通，电枢开始高速旋转。电枢的旋转经主动齿轮 13 和内啮合齿轮 12 减速，再经螺旋花键轴，传给单向离合器，最后经驱动齿轮传给飞轮，使发动机起动。以后的工作过程，与电磁啮合型起动机相同。

减速起动机的减速装置有三种形式：内啮合式、外啮合式和行星齿轮式，其中以内啮合式使用最为普遍，如图 1.2-105 所示。它们的优、缺点见表 1.2-18。

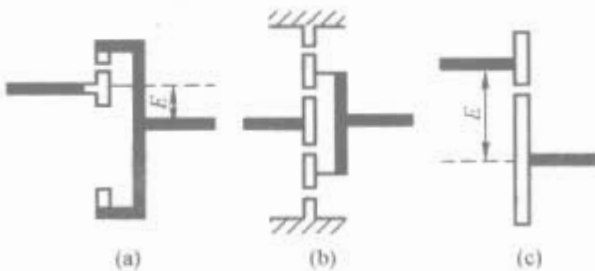


图 1.2-105 齿轮减速器类型

(a) 内啮合式；(b) 行星齿轮式（同轴式）；(c) 外啮合式

表 1.2-18 三种减速装置的比较

形 式	内啮合式	行星齿轮式	外啮合式
齿轮数	2	4 或 5	2
噪 声	低	高	低
可靠性	高	低	高
轴向中心距 (E)	小	0	大
减速比 (K)	$2.5 < K < 4$	$K < 3.8$	$1 < K < 4$

3.10 永磁减速式起动机

永磁减速式起动机的磁极由铁氧体或钕铁硼永磁材料制成，由于取消了磁场绕组，使得起动机的结构简化，体积、质量也相应减小。

北京 BJ2021（切诺基）吉普车上装用的 12VDW1.4 型起动机（德国 BOSCH 公司生产）即是永磁减速式起动机，其原理简图如图 1.2-106 所示。

起动机中有 6 块永久磁极，用弹性保持片固定于机壳内。传动机构为滚柱式单向离合器。减速装置为行星齿轮减

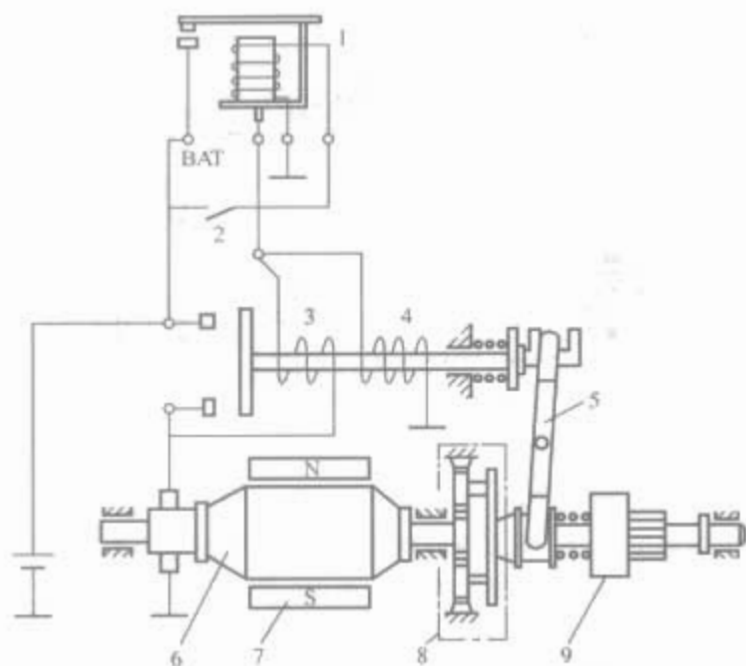


图 1.2-106 12VDW1.4 型永磁减速式起动机原理简图
1—起动机继电器；2—点火开关；3—吸引线圈；4—保持线圈；
5—拨叉；6—电枢；7—永久磁极；8—行星齿轮减速装置；
9—滚柱式单向离合器

速装置，它以电枢轴齿轮为太阳轮，另有 3 个行星齿轮及一个固定内齿圈，其啮合关系如图 1.2-107 所示。

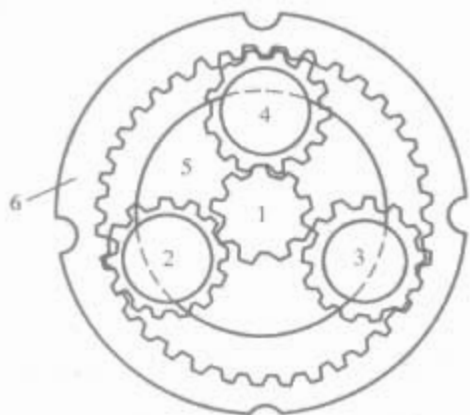


图 1.2-107 行星齿轮减速装置的啮合关系
1—太阳轮；2, 3, 4—行星齿轮；
5—行星齿轮支架（输出轴）；6—内齿圈

太阳轮压装在电枢轴上，与 3 个行星齿轮同时啮合。3 个行星齿轮的轴压装在一个圆盘上（行星齿轮在轴上可以灵活转动）。该圆盘与驱动齿轮轴制成一体，驱动齿轮轴一端制有螺旋花键，与单向离合器传动套筒内的螺旋花键配合。内齿圈由塑料注塑而成，3 个行星齿轮在其上滚动，内齿圈外缘制有定位用的槽，以便嵌放在后端盖上。

起动机继电器有两对触点，一对触点控制吸引线圈和保持线圈的电路，另一对触点（图 1.2-107 中未画出）用于启动时短路点火系统初级电路中的附加电阻，以增大初级电流，改善启动性能。起动机不工作时，起动机继电器的两对触点均处于打开状态。

该起动机的工作过程与 QD124 型起动机基本相同，不同之处在于电枢轴产生的转矩需经行星齿轮减速装置才能传给起动机的驱动齿轮。转矩传递程序为：电枢轴产生的转矩经电枢轴齿轮（太阳轮）→行星齿轮及支架→驱动齿轮轴→滚柱式单向离合器→驱动齿轮→飞轮。

3.11 起动机保护电路

发动机启动后，若驾驶员未及时释放启动开关，就会造成单向离合器的磨损和蓄电池能量的消耗。又如发动机工作时，不慎将启动开关再次接通，就会造成起动机驱动齿轮与

飞轮齿环的撞击，从而加速了它们的损坏。为了防止上述错误操作，应采取一定的保护电路，以提高启动的可靠性并延长起动机的使用寿命。

对驱动保护电路的要求是：发动机一旦启动后，应能使起动机自动停止工作；发动机工作时，即使错误地接通了启动开关，起动机也不会工作。

现代汽车应用的起动机保护电路都是依靠汽车交流发电机的中性点电压以及相应的继电器来完成的。

东风 EQ1090F 型汽车的起动机保护电路为一个启动复合继电器，它由启动继电器和保护继电器两部分组成，如图 1.2-108 所示。启动继电器的触点是动合的，它的作用是控制起动机电磁开关的工作。保护继电器的触点是常闭的，它的磁化线圈一端搭铁，一端接至发电机的中性点，承受交流发电机中性点电压，其作用是保护起动机并控制充电指示灯。

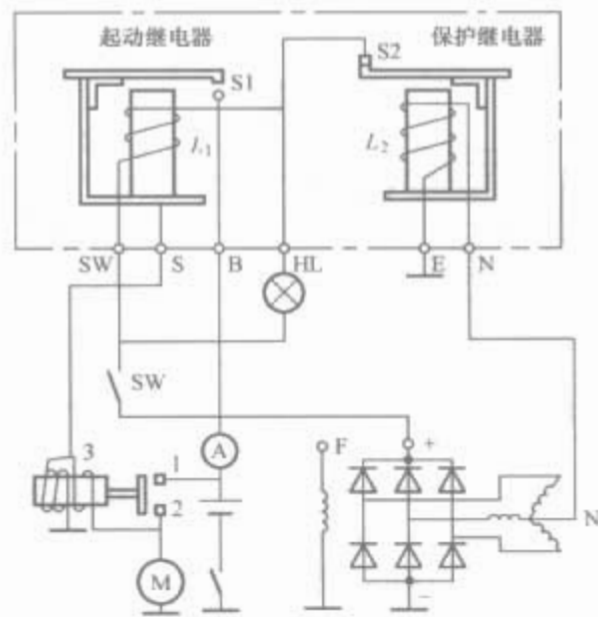


图 1.2-108 JD136 型驱动复合继电器

启动复合继电器的工作原理如下：

（1）启动时，将点火开关旋至启动挡位，则启动继电器的常开触点 S1 闭合，充电指示灯亮。其电路为：

蓄电池正极 → 电流表 → 点火开关 SW → 接线柱 SW → 线圈 L_1 → S2、磁轭 → 搭铁 → 蓄电池负极。
充电指示灯 → “HL” 接丝柱 → S2、磁轭 → 搭铁 → 蓄电池负极。线圈 L_1 产生电磁吸力，于是 S1 闭合，将起动机电磁开关吸引线圈和保持线圈的电路接通。其电路如下：

蓄电池正极 → 电流表 → 接线柱 B → S1 → 磁轭 → 接线柱 S → 保持线圈 → 搭铁 → 蓄电池负极。
吸引线圈 → 起动机磁场绕组、电枢绕组 → 搭铁 → 蓄电池负极

在吸引线圈和保持线圈两个线圈电磁吸力的共同作用下，将起动机主电路接通，蓄电池电流便流经起动机磁场绕组和电枢绕组，使起动机发出正常转矩转动曲轴。

（2）发动机启动后，如驾驶员没有及时松开点火开关，由于交流发电机电压升高，当中性点电压达 5V 时，在保护继电器线圈 L_2 的电磁力作用下，使 S2 打开，切断了充电指示灯的电路，充电指示灯熄灭，同时又将 L_1 的电路切断，于是 S1 打开，则起动机电磁开关释放，切断了蓄电池与起动机间的电路，起动机便会自动停止工作。

（3）发动机工作时，在交流发电机中性点电压的作用下，S2 一直处于打开状态， L_1 中无电流，则 S1 始终处于打开状态，起动机电路就不能接通。所以即使驾驶员操作失误，又将点火开关旋至启动挡时，起动机也不会工作，这就避免了起动机驱动齿轮被打坏的危险，从而起到了保护启动

机的作用。

3.12 起动系的故障诊断

起动系统包括蓄电池、起动机、继电器、连接导线等，其故障有电气方面的，也有机械方面的。现以东风EQ1090F所用起动机为例，分析故障现象及其原因，如图1.2-101和图1.2-108所示。

3.12.1 起动机不转动

3.12.1.1 原因

- (1) 蓄电池存电不足，电线接头松动或极柱太脏。
- (2) 起动机电磁开关触点烧蚀或调整不当而未闭合。
- (3) 磁场绕组或电枢绕组断路、短路或搭铁。
- (4) 绝缘电刷搭铁，或电刷在电刷架内卡死，弹簧折断。
- (5) 电磁开关中的吸引线圈断路、短路。
- (6) 起动继电器的触点不能闭合，或触点烧蚀、油污，保护继电器的触点烧蚀、油污。

3.12.1.2 故障诊断方法

- (1) 首先检查蓄电池充电情况和导线连接情况。若蓄电池电量充足、接线良好，则故障出在起动机、电磁开关或复合继电器。
- (2) 用螺钉旋具连接起动机两接线柱1和2，起动机不转动，则故障在起动机内部，用螺钉旋具短接时无火花，表明起动机内部有断路。若有强烈火花，但起动机不转，则表明起动机内部有短路或搭铁。拆下起动机进一步检修。
- (3) 检查起动机电磁开关。用螺钉旋具短接起动机火线接线柱1与电磁开关接线柱3，若起动机不转，说明电磁开关有故障，应拆开检修。若起动机转动，说明电磁开关正常，再检查复合继电器。
- (4) 检查起动继电器。用螺钉旋具短接接线柱S与B，起动机转动，说明起动继电器有故障，可用砂条打磨其常开触点S1，或拆下检修。

3.12.2 起动机运转无力

若蓄电池电量良好，线路也正常，而起动机运转无力，则原因可能是：

- (1) 换向器太脏。
- (2) 电刷磨损过多或电刷弹簧压力不足，使电刷接触不良。
- (3) 磁场绕组或电枢绕组有局部短路。
- (4) 起动机开关触点烧蚀。
- (5) 发动机装配过紧或温度过低，使转动阻力过大。

3.12.3 起动机驱动齿轮与飞轮不能啮合且有撞击声

原因：

- (1) 起动机驱动齿轮或飞轮齿环磨损过甚或损坏。
- (2) 开关闭合过早，起动机驱动齿轮尚未啮入，起动机就已旋转。

3.12.4 起动机驱动齿轮与飞轮周期性撞击

原因：电磁开关中的保持线圈断路、短路或搭铁不良。

3.12.5 起动机空转

原因：单向离合器打滑。

3.12.6 单向离合器不回位

原因：

- (1) 复合继电器中的起动继电器触点烧蚀。
- (2) 电磁开关中触点与接触盘烧蚀。
- (3) 复位弹簧失效。
- (4) 蓄电池容量不足，齿轮啮合后不运转。

- (5) 起动机安装不牢，电机轴线倾斜。

3.12.7 失去自动保护性能

发电机起动后，驾驶员不松开钥匙，起动机不能自动停止运转，充电指示灯也不熄灭；发动机运转过程中，将起动开关扭至起动挡位，则发出齿轮撞击声。说明已无保护功能。

- (1) 充电系统发生故障，发电机中性点无电压。
- (2) 发电机接线柱N至复合继电器接线柱N的导线断路或连接不良。
- (3) 复合继电器中保护继电器的触点烧蚀，或磁化线圈断路、短路、搭铁。
- (4) 复合继电器搭铁不良。

3.13 起动机的检查

3.13.1 转子的检查

3.13.1.1 电枢绕组的检查

电枢绕组易发生的故障有断路、短路和搭铁。

断路故障多发生在线圈端部与换向器的连接处。由于长时间大电流运转或电枢铁心与磁极铁心摩擦，使得电枢温度过高，焊锡熔化，而使焊在换向片上的线头脱焊所致，一般较易发现。

电枢绕组的短路故障，必须使用电枢感应仪进行检查。电枢感应仪是一个在V形极掌上绕有线圈的装置，如图1.2-109所示。当感应仪的线圈1接上220V交流电源时，在其磁路中便产生交变磁场。若将电枢放在感应仪的V形槽中，则该交变磁场切割电枢绕组，就会在绕组中产生感应电动势。

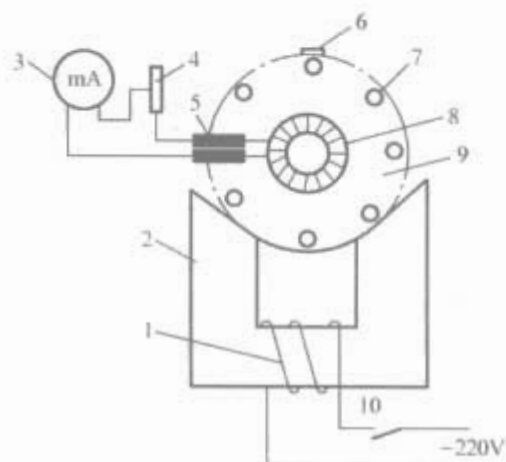
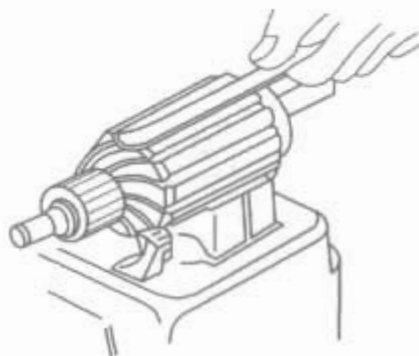


图 1.2-109 电枢感应仪

- 1—感应仪线圈；2—感应仪铁心；3—毫安表；
4—可变电阻；5—毫安表触针；6—试验用薄钢片；
7—电枢绕组；8—换向器；9—电枢铁心；10—开关

如图1.2-110所示，将电枢放在电枢感应仪的V形槽上，接通电源，用一薄钢片放在电枢铁心上方的线槽上，同时转动电枢，在每个槽上依次试验，若钢片在某一槽上发生振动，则表示有短路故障。这是因为当线圈发生短路后，短路的线匝形成闭合回路，在感应仪交变磁场的作用下，其中产生交变电流，该交变电流又产生一局部的交变磁场，钢片就会在交变磁场的吸引下发生振动。



起动机用电枢感应仪检查用波绕法，因此当相邻两电枢短路故障

换向片间短路时，钢片会在四个槽出现振动；当同一个槽中上下两层导线短路时，钢片会在所有的槽上都振动。

电枢绕组的搭铁故障应使用 220V 交流试灯法进行检查。将交流试灯的两根触针分别接触电枢轴和换向器片。若

试灯亮，说明有搭铁故障。

电枢绕组有短路、搭铁故障时，应重新绕制。常用起动机的磁场绕组与电枢绕组的有关数据见表 1.2-19。

表 1.2-19 常用车型起动机磁场绕组与电枢绕组数据

起动机 型号	磁 场 绕 组				电 枢 绕 组							
	绕组 总数	每个绕 组匝数	绕组 连接法	铜线截面积 (mm ²)	铁心 槽数	换向器 片数	绕组 型式	槽节距	换向器 节距	线圈 匝数	铜线截面积 (mm ²)	线圈数
QD124	4	8.5	两串两并	1.25×6	27	27	波绕	1~8	1~14	1	2×4.4	27
ST8B	4	5.5	串联	1.8×6.9	23	23	波绕	1~7	1~13	1	2.5×4.2	23
2201												
315												
ST96	4	6	两串两并	1.81×6.9	23	23	波绕	1~7	1~12	1		23
321	4	7	两串两并	1.25×5.5	31	31	波绕	1~9	1~17	1	1.45×4.4	31
ST614	4	10	两串两并	1.45×9.3	27	27	波绕	1~7	1~14	1	2.63×5.5	27
QD27	4	7		2.26×8	25	25	波绕	1~7	1~13	1	2.83×6.9	25

3.13.1.2 换向器的检查

换向器故障多为表面烧蚀或失圆。轻微烧蚀可用 00 号砂布打磨。严重烧蚀或圆度误差大于 0.025mm 时，应予以车光、车圆，但换向器的径向厚度不得小于 2mm，否则应予更换。

3.13.1.3 电枢轴的检查

用千分表检查电枢轴是否弯曲。铁心表面对轴线径向跳动应不大于 0.15mm，否则说明电枢轴弯曲严重，应予以校直。

3.13.2 磁场绕组的检查

磁场绕组的故障有断路、短路和搭铁。

(1) 磁场绕组断路的检查。磁场绕组断路一般多是由于绕组引出线头脱焊、虚焊所致，可用万用表或低压试灯检查。

(2) 磁场绕组匝间短路的检查。磁场绕组的外部包扎层若已烧焦、脆化，则一般表明匝间已绝缘不良。若外部完好，无法判断时，可把绕组套在铁棒上放入电枢感应仪中，如图 1.2-111 所示。感应仪通电 3~5min 后，如绕组发热则表明有匝间短路。

(3) 磁场绕组搭铁的检查。可用 220V 交流试灯进行检查。先将绝缘电刷从绝缘电刷架中取出，并注意不要与机壳相碰，把 220V 交流试灯的两个触针分别接触起动机的绝缘电刷和机壳，如试灯不亮，表示磁场绕组与机壳绝缘良好；如试灯亮，则表明磁场绕组的绝缘损坏而搭铁。

3.13.3 单向离合器

将单向离合器夹紧在虎钳上，用扭力扳手反时针方向转动（见图 1.2-112），应能承受制动试验时的最大转矩而不打滑。如 2201 型起动机，其单向离合器应能承受 25.5N·m 的扭力而不打滑，否则应拆开，进行修理。

摩擦片式离合器在 117.6N·m 时不应打滑。而在大于 176.4N·m 时应能打滑。若不符合规定，可在压环与摩擦片之间增减垫片予以调整。



图 1.2-111 磁场绕组短路检查

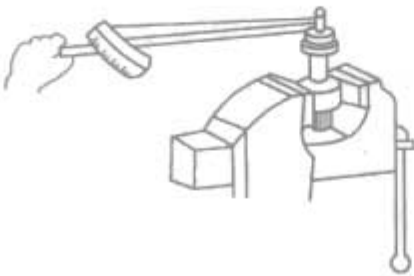


图 1.2-112 检查单向离合器是否打滑

3.13.4 衬套的配合

各轴颈与衬套的配合间隙应符合表 1.2-20 的规定。若间隙过小，应用铰刀进行铰配；若间隙过大，应更换衬套，并按规定铰削配合。

表 1.2-20 铜套与轴的配合间隙（适用于一般起动机）

名 称	标准间隙 (mm)	允许最大间隙 (mm)	铜套外圆与孔的 过盈 (mm)
前端盖铜套	0.04~0.09	0.18	0.08~0.018
后端盖铜套	0.04~0.09	0.18	0.08~0.18
中间轴承支撑板铜套	0.085~0.15	0.25	0.08~0.18
驱动齿轮铜套	0.03~0.09	0.23	0.08~0.18

3.13.5 电刷与电刷架的检查

电刷的高度应不低于新电刷高度的 2/3（国产起动机新电刷的高度为 14mm）；电刷与换向器的接触面积应在 75% 以上；电刷在电刷架内应活动自如，无卡滞现象。

用 220V 交流试灯检查绝缘电刷架的绝缘情况，如电刷架搭铁，则应更换绝缘垫后重新铆合。

用弹簧秤检查电刷弹簧的压力，一般为 11.7~14.7N。若压力不够，可将弹簧向与螺旋相反的方向扳动，以增加弹力。若无效时，则应更换。

3.13.6 电磁开关的检查

(1) 检查接触盘表面和触点表面。轻微烧蚀可用砂布打光，严重烧蚀应予以修复或更换。

(2) 检查吸引线圈和保持线圈。用万用表欧姆挡检查吸引线圈和保持线圈的电阻值，标准值见表 1.2-21。若已断路或有严重短路，应重绕。重绕时应注意导线的直径，匝数以及绕线的方向均应与原来的相同。常见起动机电磁开关的线圈数据见表 1.2-21。

表 1.2-21 起动机电磁开关线圈数据

起动机 型式	线圈名称	导线 (mm)	绕向(从 顶端看)	匝数	电阻(Ω, 20℃时)
ST614	吸引线圈	QZφ0.83/φ0.92	同方向	250±5	0.83~0.85
	保持线圈	QZφ0.83/φ0.92		150±5	1.07~1.14
321	吸引线圈	Qφ0.9	同方向	235 ⁺⁵ ₋₃	0.6±0.05
	保持线圈	Qφ0.83		245±3	0.97±0.1
	起动开关线圈	φ0.21		700±10	13±0.6

续表					
起动机 型式	线圈名称	导线 (mm)	绕向(从 顶端看)	匝数	电阻(Ω, 20℃时)
QD124	吸引线圈	φ0.9	同方向	235^{+5}_{-3}	0.6 ± 0.05
	保持线圈	φ0.83		245 ± 3	97 ± 0.1
QD124A	吸引线圈	φ1.25	同方向	200^{+3}_{-4}	0.33 ± 0.03
	保持线圈	φ0.75		200^{+3}_{-4}	1.29 ± 0.12

(3) 电磁开关的测试。

1) 电磁开关闭合电压和释放电压的检查。将电磁开关装回起动机上,按图 1.2-113 接线,并在起动机驱动齿轮和限位垫圈之间放一垫块以模拟驱动齿轮与飞轮齿环顶齿状态,然后闭合开关,逐渐调高电压,直至试灯发亮。灯亮瞬间的电压即为电磁开关的闭合电压,应符合表 1.2-22 的规定。随后再逐渐调低电压,直到电磁开关释放,试灯熄灭。这一瞬时的电压即为释放电压。释放电压不应大于标称电压的 40%。

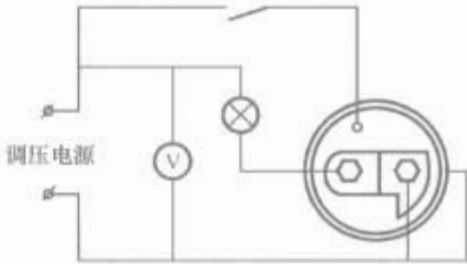


图 1.2-113 电磁开关吸放性能测试

2) 电磁开关断电能力的检查。当起动机处于制动状态时,切断电源,其主触点应可靠断开;否则,说明电磁开关有故障。

表 1.2-22 电磁开关的闭合电压

环境温度 (℃)	标称电压 (V)	
	12	24
23	≤9	≤24

3.13.7 起动继电器闭合电压与断开电压的检查

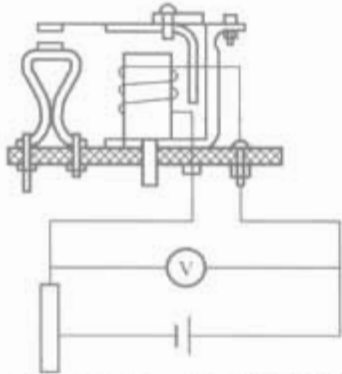


图 1.2-114 起动继电器性能检查

检查方法如图 1.2-114 所示。先将滑线式变阻器调至最大值,然后逐渐减小电阻,在触点刚闭合时,电压表的读数即为闭合电压。再逐渐增大电阻,当触点刚刚打开时,电压表的读数即为断开电压。闭合电压和断开电压应符合表 1.2-23 的规定,否则应予以调整。

表 1.2-23 起动继电器触点闭合和断开电压

名 称	12V 系统	24V 系统
触点闭合电压 (V)	6~7.6	14~16
触点断开电压 (V)	3~5.5	4.5~8

3.13.8 复合继电器的检查

起动继电器应测试其闭合电压与断开电压。测试线路如图 1.2-115 (a) 所示。先将滑线式变阻器调至最大值,接通开关 S,逐渐减小电阻,当试灯亮的瞬间,电压表的读数即为闭合电压,应不大于 5~6.6V。然后逐渐增大电阻,当试灯熄灭

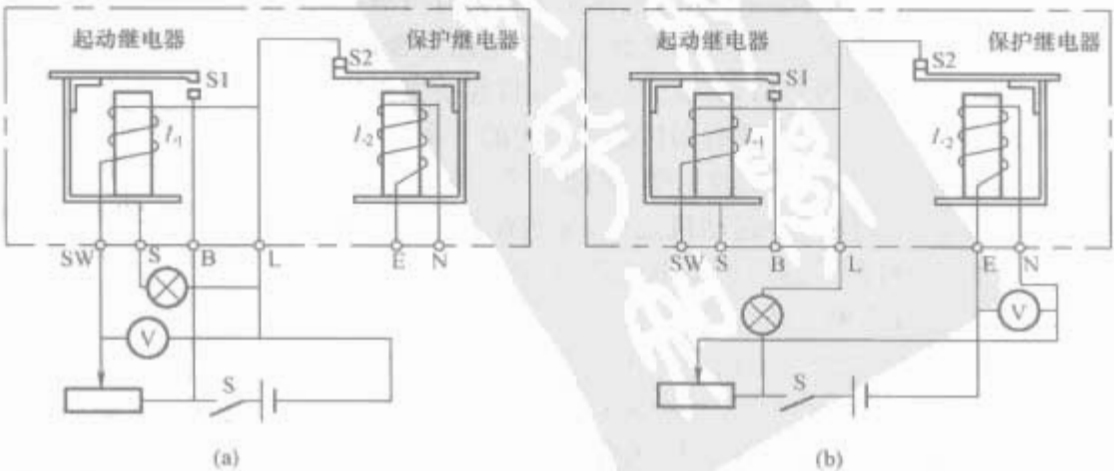


图 1.2-115 复合继电器性能测试
(a) 起动继电器性能测试; (b) 保护继电器性能测试

的瞬间,电压表的读数即为断开电压,应不大于 3V。
保护继电器也应测试其动作电压与释放电压。测试线路如图 1.2-115 (b) 所示。将滑线式变阻器调至最大值,接通开关 S,试灯亮。逐渐减小电阻值,当试灯熄灭的瞬间,电压表的读数即为动作电压,应为 4.5~5.5V。然后再逐渐增大电阻值,当试灯再次亮的瞬间,电压表的读数即为释放电压,应小于 3V。
国产起动机复合继电器的主要性能见表 1.2-24。

表 1.2-24 起动机复合继电器的主要性能

型号	额定电压 (V)	起动继电器			保护继电器		适用车型
		闭合电压 (V)	断开电压 (V)	瞬时电流 (A)	动作电压 (V)	释放电压 (V)	
JD136	12	5~6.6	≤3	75	4.5~5.5	≤3	EQ1090F
JD236	24	10~13.2	≤6	35	9~11	≤3	EQ140
JD171	12	≤7	≤1.5	75	4.5~5.5	≤2	CA1090
JD271	24	≤14	≤3	35	9~11	≤4	CA141

3.14 起动机的调整与试验

起动机经检修后,应进行一系列调整与试验,以确保其性能符合要求。现以 QD124 型起动机为例加以讨论。
3.14.1 调整
(1) 驱动齿轮静止位置的调整。起动机不工作时,驱动齿轮端面与端盖凸缘之间的距离应为 29~32mm,如不合要求,可调整定位螺钉 20 (见图 1.2-101)。

(2) 开关接通时间的调整。当接触盘将主电路接通时,驱动齿轮与限位螺母之间的距离应为 (4.5±1) mm,如不合要求,可先脱开连接片 18 与调节螺钉 17 之间的连接 (见图 1.2-101),然后旋入或旋出调节螺钉 17 即可进行调整。

(3) 附加电阻线短路开关的调整。在主电路接通的同时或稍早,附加电阻线应短路。如有不当,可弯曲附加电阻短路开关接线柱内的黄铜片 6 (见图 1.2-101) 进行调整。

3.14.2 试验

起动机修复后,必须进行下列两种试验,如不符合要求,应重新检查和修理。

3.14.2.1 空载试验

测量起动机的空载电流和空载转速并与标准值比较,以判断起动机内部有无电路和机械故障。试验方法如下:将起动机夹在虎钳上,按图 1.2-116 接线。接通起动机电路 (每次试验不要超过 1min,以免起动机过热),起动机应运转均匀、电刷下无火花。记下电流表、电压表的读数,并用转速表测量起动机转速,其值应符合表 1.2-25 的规定。

表 1.2-25 常用车型起动机的主要技术数据

型 号	规 格		空载特性			全制动特性			齿 轮			适用车型
	额定电 压(V)	额定功 率(W)	电压 (V)	电流 (A)	转速 (r/min)	电压 (V)	电流 (A)	扭矩 (N·m)	齿数	模数	压力角 (°)	
QD1212、QD1211、 QD124	12	2	12	≤95	≥5000	8	≤650	≥29.4	3	11	20	EQ1090
QD1215、QD124A	12	2	12	≤90	≥5000	8	≤700	≥29.4	3	9	20	CA1090
QD1225、QD1229	12	0.95	—	—	—	—	—	—	2.1167	9	12	桑塔纳
QD1225F、QD1229C	12	0.95	—	—	—	—	—	—	2.1167	9	12	广州标致 504
QD1226A	12	0.8	—	—	—	—	—	—	2.25	8	20	天津大发 TJ110JT730
321、QD1277	12	1.3	12	≤100	≥5000	8	≤525	≥16	2.5	9	15	BJ2020
QD1237、QDY124①	12	1.4	—	—	—	—	—	—	2.1167	9	20	北京切诺基
QD1317、QD142A	12	3	—	—	—	—	—	—	2.5	9	15	南京依维柯货车
ST614、QD2612	24	5.1	12	≤80	≥6500	—	≤900	≥60	4	11	20	JN150
QD2621②	24	4.4	—	—	—	—	—	—	3	11	15	斯可达 706R、太脱拉 111、依发 H6
QD278③	24	5.4	—	—	—	—	—	—	3	11	14.5	斯太尔 1491、280
QD26	24	8.08	24	≤90	≥3200	9	≤1800	≥142	3.175/ 2.45	12	20	红岩 CQ261、贝利埃 GOH、GBC
QD27E	24	8.08	24	≤120	≥6000	12	≤1700	≥142	3.5	11	15	五十铃 TD60AD
QD1221	12	0.95	—	—	—	—	—	—	2.25	8	20	夏利
QD117	12	0.6	—	—	—	—	—	—	2.54	8	20	奥拓
QD50C	24	5.1	24	≤90	≥6000	10	≤900	≥58.8	3	13	15	日野 TE21、TE220

①为永磁减速式；②为电枢移动式；③为齿轮移动式；其余均为强制啮合式。表中部分型号系行业标准颁布前沿用的型号。

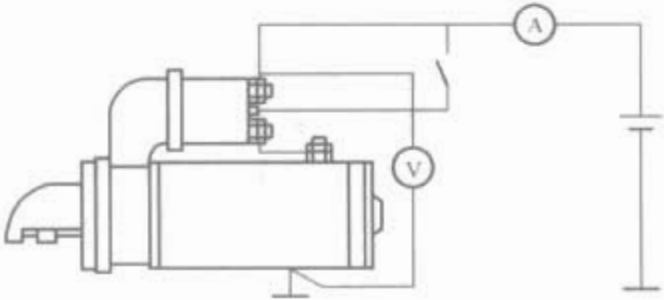


图 1.2-116 起动机空载试验电路图

若电流大于标准值，而转速低于标准值，表明起动机装配过紧或电枢绕组和磁场绕组内有短路或搭铁故障。若电流和转速都小于标准值，则表示起动机线路中有接触不良的地方（如电刷弹簧压力不足，换向器与电刷接触不良等）。

3.14.2.2 全制动试验

全制动试验应在空载试验的基础上进行，空载试验不合格的起动机不应进行全制动试验。

全制动试验的目的是测量起动机在完全制动时所消耗的电流（制动电流）和制动力矩，以判断起动机主电路是否正常，并检查单向离合器是否打滑，试验方法如下：将起动机夹持在试验台上，使杠杆的一端夹住起动机驱动齿轮的三个齿（见图 1.2-117），电路连接与空载试验相同（见图 1.2-116）。按下开关 S（必须按紧，不得松开）起动机通电，呈现制动状态，观察单向离合器是否打滑并迅速记下电流表、电压表及弹簧秤的读数，其值均应符合表 1.2-25 的规定。

若制动力矩小于标准值而电流大于标准值，则表明磁场绕组或电枢绕组中有短路和搭铁故障；若力矩和电流都小于标准值，表明线路中接触电阻过大；若驱动齿轮锁止而电枢轴有缓慢转动，则说明单向离合器有打滑现象。

全制动试验应注意：每次试验通电时间不要超过 5s，以

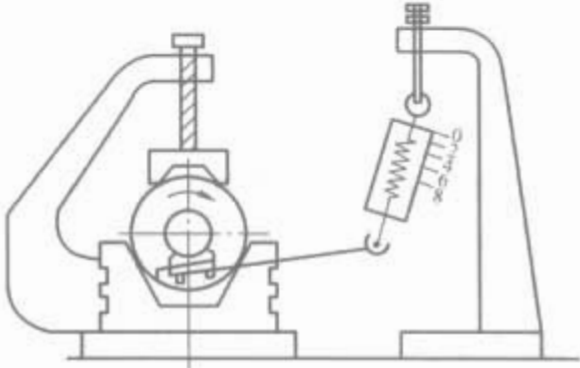


图 1.2-117 起动机全制动试验

免损坏起动机及蓄电池；试验过程，工作人员应避开弹簧秤夹具，以防发生人身事故。

4 汽车配线

对于汽车电气设备，可根据其用途和工作性能归纳为电源系、起动系、点火系、电子控制系、照明、信号、仪表、报警系和辅助电气设备等部分。而汽车电气设备总线路就是通过开关、熔断器、导线等，将上述电气系统合理地连接而组成的总体。

随着人们对汽车的安全性、舒适性和经济性的要求越来越高，汽车上的电器配置、功能也越来越多，所以连接各个电器件的线束也越来越复杂，成为当代汽车故障的多发环节，也因此汽车设计和生产制造中受到越来越多的关注。下面将就汽车配线的有关问题（包括导线规格、插接器、线束、电路图等方面）进行说明。

4.1 汽车的配线

4.1.1 低压线 and 高压线

汽车电气系统的导线有低压线 and 高压线两种。低压导线

是传输低电压和小电流的导线,绝缘层较薄。高压导线是传送高电压的导线,用于点火系统的高压点火线就属于高压导线。低压电缆是传输大电流的导线,用于起动机、蓄电池的连接和搭铁。高压导线和低压电缆的绝缘层都较厚。

汽车电路用的低压导线由多股铜线拧成线芯,线芯外面再包裹聚氯乙烯(PVC)绝缘层构成。铜的电阻率小,且易于与电线接头压接或焊接,在汽车上还用到少量银、金、铝和黄铜薄板等导电材料。

单股铜导线可以用在不需要柔软性的低压小电流电路。在高压大电流或需要柔软性的电路只能用多股铜导线。之所以用多股导线,是因为电流具有在芯线表面流动(集肤效应)的特性。同样标称截面的导线,多股导线芯线的表面积比单股导线大,电阻也比单股导线小(见图 1.2-118)。采用 PVC 塑料作绝缘材料,是由于 PVC 具有耐温度老化和抗腐蚀的性能。PVC 还能耐蓄电池酸液、防冻液和汽油的腐蚀。

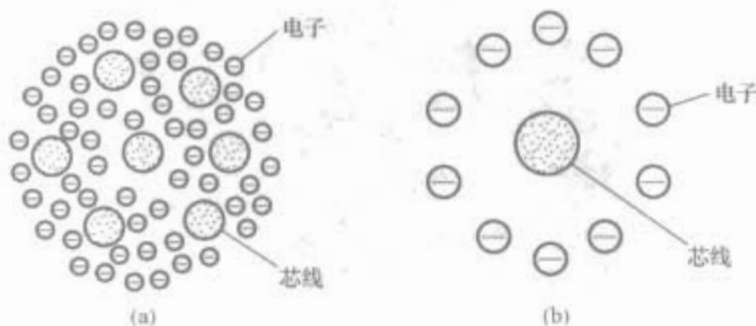


图 1.2-118 多股导线为电子流动提供的表面积比单股导线大得多
(a)多股导线;(b)单股导线

点火系统中的附加电阻是应用电阻线的例子(见图 1.2-119)。附加电阻装在点火开关和点火线圈之间,用它来防止点火系统初级电路过压。当点火线圈一次绕组不需要那么大的电流时,由附加电阻减小流过绕组的电流。它还起到稳定点火线圈电压的作用。有些点火系统的附加电阻就是一根电阻线。

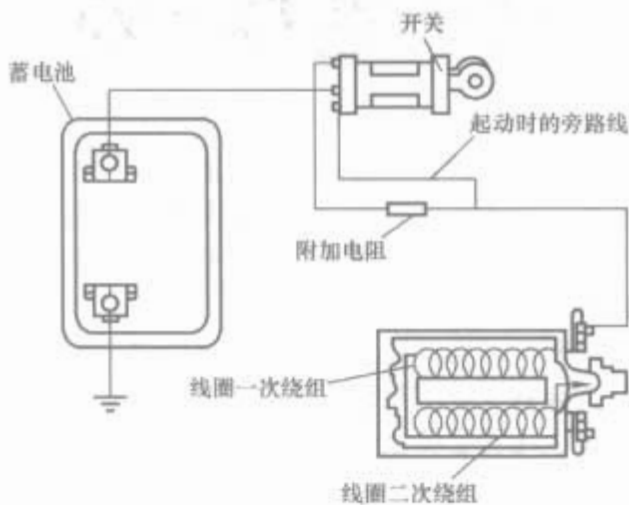


图 1.2-119 附加电阻用于一些点火系统初级线路

高压点火线是一种阻尼线,作用是防止火花出现时辐射出的电磁能对其他设备的干扰。大多数高压点火阻尼线是由经过石墨浸渍处理的尼龙丝、人造丝或玻璃纤维制成线芯,再用橡胶等绝缘材料包裹(见图 1.2-120)。经过石墨浸渍处理的线芯,有足以减少射频干扰辐射的电阻而又不影响发动机点火。由于老化和温度变化等原因,高压阻尼点火线会日渐耗损,其阻值会发生变化。大多数高压阻尼点火线的阻值为每英尺(1ft=0.3048m)3000~6000Ω,也有每英尺 6000Ω 至 12000Ω 的。试验时的验收值以每英尺 10000Ω 作为一般技术要求。

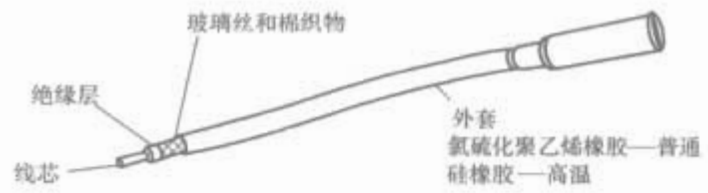


图 1.2-120 典型的高压点火线

高压点火线的高压会引起电磁感应,如果几根高压点火线的相互位置摆放不当,有可能出现窜火。要防止窜火,每根高压点火线必须放在合适的分隔架上,发火次序彼此挨着的两根平行高压点火线应尽可能远离放置(见图 1.2-121)。当出现窜火时才不致于火花从一根线跳到另一根线。这样摆放之后,若仍有窜火,是其他磁场感应造成的。两根平行安放的高压点火线,如按发火次序正好一根发火后轮到另一根发火,这是最容易发生窜火感应的情况。

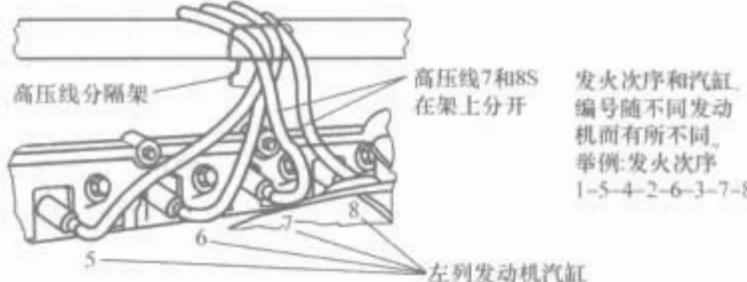


图 1.2-121 恰当安放高压点火线能避免窜火

4.1.2 导线规格及颜色代号

选择导线规格时必须留出保险余量。决定所用导线的恰当规格要顾及以下三个因素:

- (1)在要求长度的条件下,导线必须粗到足以传输负载部件正常运行所必需的电流。
- (2)导线必须能耐预料到的振动。
- (3)导线必须能耐预料到的热辐射。

导线规格是根据导线线芯截面积制订的。截面积越大,导线的电阻越小。

关系到导线电阻的另一因素是温度,温度升高,电阻也增加。因此,在汽车高温处(如发动机机舱)的导线,选择导线规格时必须选取电阻增加后不会影响负载部件的运行。除此之外,导线的绝缘层也必须是耐高温的。

导线截面积主要根据工作电流选择,但是对于一些电流很小的电器,为保证导线的机械强度,所用的导线截面积也不得小于 0.5mm²。各种低压导线截面积所允许的负载电流见表 1.2-26。

表 1.2-26 低压电线标称截面积允许负载电流值										
导线标称截面积(mm ²)	0.5	0.8	1.0	1.5	2.5	3.0	4.0	6.0	10	13
允许电流(A)	—	—	11	14	20	22	25	35	50	60

由于起动机是短期工作,为了保证起动机正常工作能发出足够的功率,要求在线路上每 100A 的电流所产生的电压降不能超过 0.1~0.15V,因此导线截面积较大。汽车 12V 电气系统主要线路导线截面积推荐值见表 1.2-27。

表 1.2-27 12V 电气系统主要线路导线截面积推荐值	
标称截面积(mm ²)	用途
0.5	尾灯、顶灯、指示灯、仪表灯、牌照灯、燃油表、刮水器电动机、电钟、水温表、油压表
0.8	转向灯、制动灯、停车灯、分电器
1.0	前照灯、电喇叭(3A 以下)
1.5	电喇叭(3A 以上)

续表

标称截面积 (mm ²)	用 途
1.5~4.0	其他连接导线
4~6	电热塞电线
6~25	电源线
16~95	起动机电线

我国及世界多数国家汽车电系用导线是按上述标称截面积规定的,但美国汽车用导线规定了统一导线号码,线规号码越大,导线越细,允许电流值越小。美国线规与公制导线标称截面积的对应关系见表 1.2-28。

表 1.2-28 公制导线标称截面尺寸与美制线规对照表

美制线规(AWG)	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
公制截面尺寸(mm ²)	0.5	0.8	1.0	2.0	3.0	5.0	8.0	13.0	19.0	32

汽车的高压导线耐压极高,一般应在 1.5kV 以上,它在点火系中承担高压电输送任务,而其工作电流很小,故截面积较小,约 1.5mm²,绝缘层厚度很厚,多采用橡胶绝缘,加有浸漆棉质编包。

为便于区分汽车线路,其导线绝缘层采用不同颜色。有些导线采用单一颜色,有些则在主色基础上加辅助色。

在电路图中,导线的颜色多用英文字母表示(有一些国产汽车用汉字标出)。若导线为单色,则只用一个字母,若另有辅色,则用两个字母表示。其中前一个字母表示其主色,后一个字母表示辅色。单色线颜色的代号见表 1.2-29。双色线的颜色由表 1.2-30 规定的两种颜色组成。双色线的主色所占比例大些,辅助色所占比例小些,一般为 3:1~5:1。

表 1.2-29 汽车用电线颜色

电线颜色	黑	白	红	绿	黄	棕	蓝	灰	紫	橙
代号	B	W	R	G	Y	Br	BL	Gr	V	O

表 1.2-30 电线颜色的选用程序

选用程序	1	2	3	4	5	6
电线颜色	B	BW	BY	BR	—	—
	W	WR	WB	WBL	WY	WG
	R	RW	RB	RY	RG	RBL
	G	GW	GR	GY	GB	GBL
	Y	YR	YB	YG	YB	YW
	Br	BrW	BrR	BrY	BrB	—
	BL	BLW	BLR	BLY	BLB	BLO
	Gr	GrR	GrY	GrBL	GrB	GrB

电线颜色的选用程序,应符合表 1.2-30 的规定。

汽车电系一般分为 9 个系统,各系统的主色见表 1.2-31。

表 1.2-31 汽车电路各系统的主色

序号	系统名称	电线主色	代号
1	电源系统	红	R
2	点火和起动系统	白	W
3	前照灯、雾灯及外部灯光照明系统	蓝	BL
4	灯光信号系统,包括转向指示灯	绿	G
5	车身内部照明系统	黄	Y

续表

序号	系统名称	电线主色	代号
6	仪表及警报指示和喇叭系统	棕	Br
7	收音机、电钟、点烟器等辅助装置	紫	V
8	各种辅助电动机及电气操纵系统	灰	Gr
9	电气装置搭铁线	黑	B

4.1.3 端子和插接器

为完成电源到负载部件之间可靠的接线,要用端子和插接器连接,要求它们的接触电阻越低越好,连接松动或出现腐蚀都会导致负载部件运行恶化。

端子可以压接也可以焊接在导线上,无论压接或焊接,以及端子本身,都必须能经受得住汽车振动引起的应力。图 1.2-122 为汽车电气系统常用的几种端子。此外下述几种插接器也是汽车电路常用的。

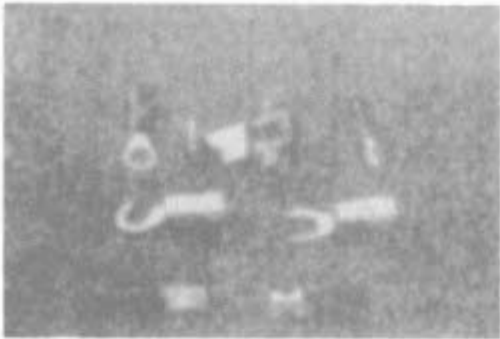


图 1.2-122 汽车电气系统用的低压导线端子

(1) 铸塑的接插器。此种接插器一般有 1~4 根导线连同端子镶嵌在插头(或插座)内(见图 1.2-123)。

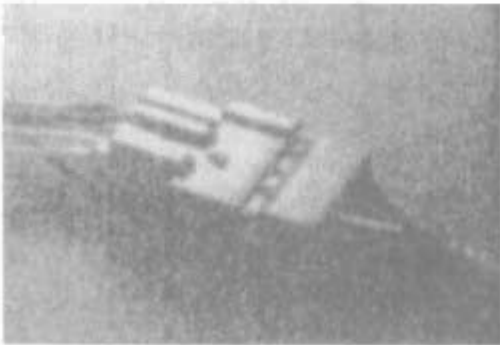


图 1.2-123 多线铸塑的插接器

(2) 多孔硬质护套插接器。此种插接器的接线端子卡在护套的孔内(见图 1.2-124),修理可从护套上卸下。

(3) 中央可过线的插接器。当有些导线必须从插接器穿过时用此种插接器(见图 1.2-125)。

(4) 全密封式插接器。此种插接器的端子尾部和护套两半结合处均装有橡胶密封件(见图 1.2-126)。它用于计算机电路,防止插接器受腐蚀而导致电压降。

(5) 半密封式插接器。此种插接器的端子尾部装有橡胶密封件(见图 1.2-127)。

一般插接器接合时,应先将其导向槽重叠在一起,使插头和插座对准且稍用力插入,这样就可以十分牢固地连接在一起。所谓插接器的导向槽,是指插接器连接时为了使其正确定位而设置的凸凹轨。一对插头、插座由于导向槽的作用一般说来不可能插错,非成对的插头与插座因其脚数及外部形状不会相同,因此也不可能插错。所以使用插接器连接电路十分方便、可靠。

为了防止汽车行驶过程中插接器脱开,所有插接器均采用闭锁装置,如图 1.2-128 所示。当要拆下插接器时,应先压下闭锁,然后再将其拉开、不压下闭锁时绝不可用力猛拉导线,以防止拉坏闭锁或导线。

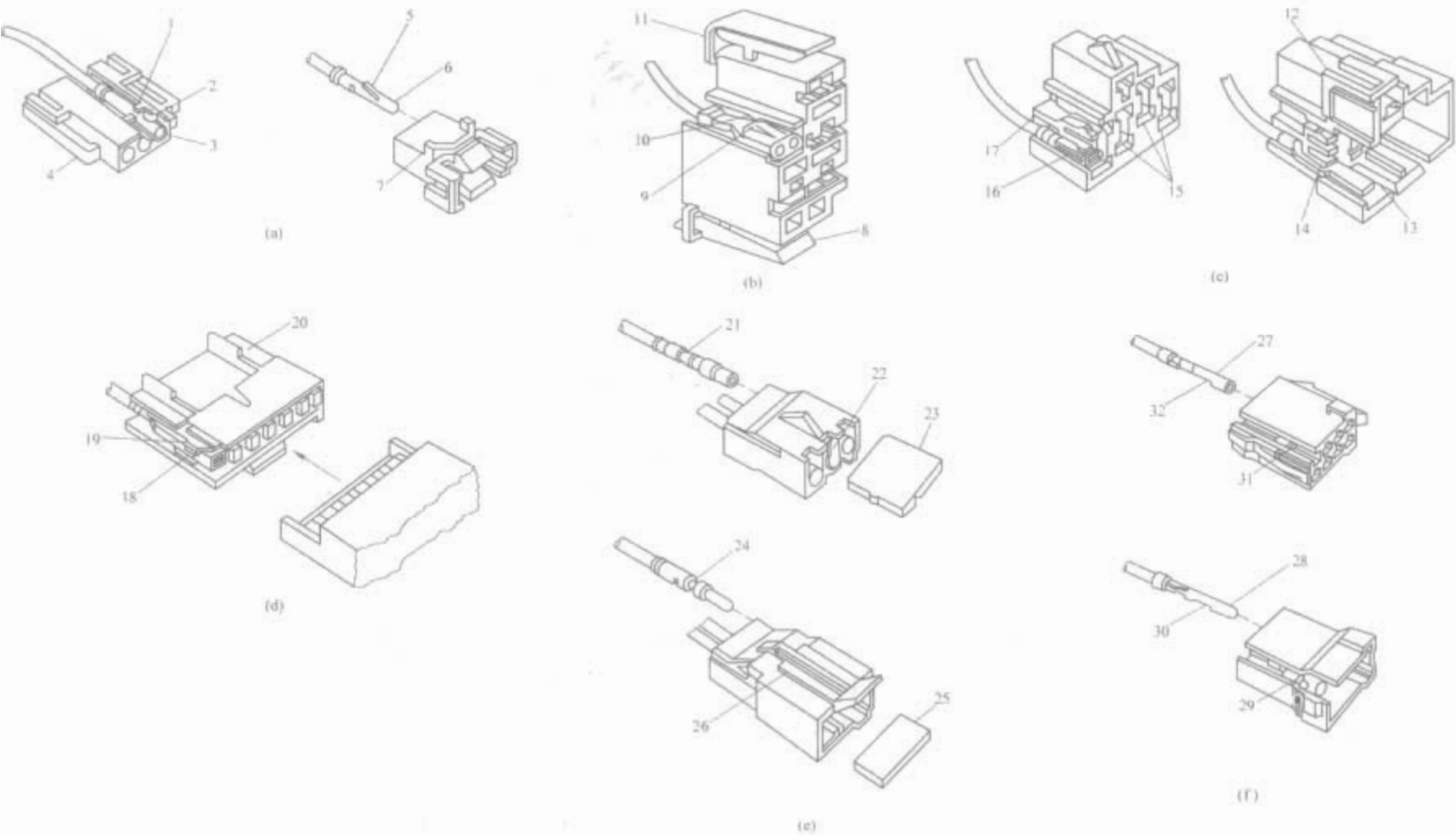


图 1.2-124 多孔硬质护套插接器

(a) 大电流插接器；(b) 锥销式插接器；(c) 片式插接器；(d) 印制电路插接器；(e) 楔块锁定式插接器；(f) 内锁住钩式插接器
1—凸肩；2、5、9—倒钎刺；3—圆柱形端子（母）；4、8、12—锁住舌片；6—圆柱形端子（公）；7—横挡；10—挡肩；11—塑料弹簧；
13—片式端子（公）；14、17—锁定爪；15—T形槽；16—片式端子（母）；18—端子钩爪；19—钩爪槽口；20—锁住钩；
21、24—环槽；22—挡爪；23、25—楔块；26—锁住舌片；27—圆柱式端子（母）；
28—圆柱式端子（公）；29、31—锁住钩；30、32—缺口

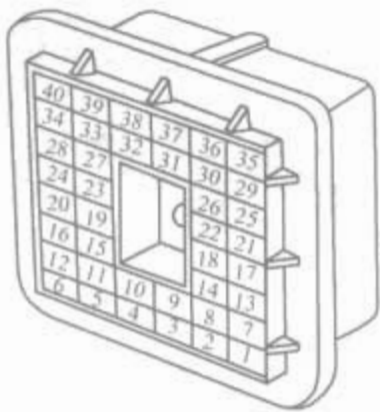


图 1.2-125 中央可过线的插接器



图 1.2-126 防止受腐蚀的全密封式插接器



图 1.2-127 半密封式插接器

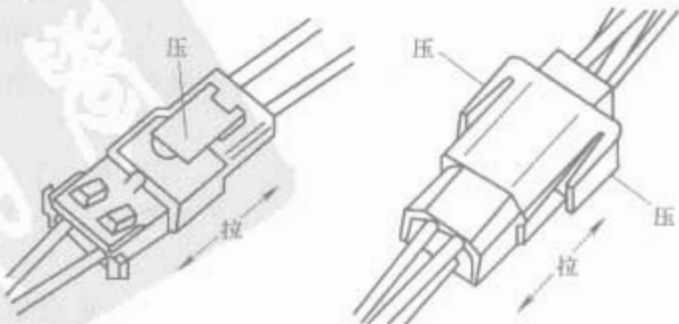


图 1.2-128 插接器的闭锁装置及拆卸

要减少电气系统插接器的数目,可以采取公共连接法,将一些安装位置彼此相近的电器部件用一个公共连接点,省去每一根导线用一个独自的插接器。公共连接点用于共享电源或公共搭铁。

图 1.2-129 为 GM 汽车公司用公共连接法减少插接器数目的例子。

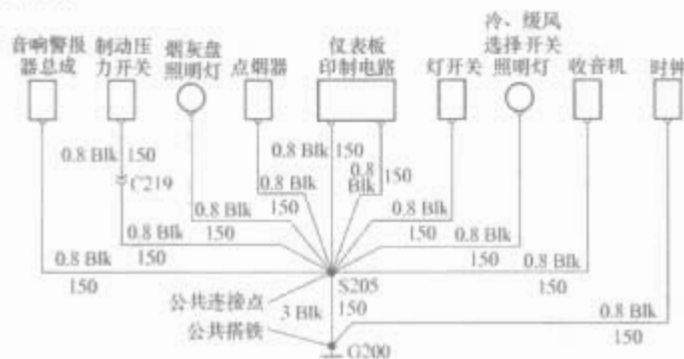


图 1.2-129 采取公共连接法减少插接器数目

4.1.4 印制电路

仪表板大多用一只线路板作为电路导线。印制电路是用薄敷铜（或其他导电材料）酚醛树脂板或玻璃纤维板来制作的。刻蚀或酸蚀掉不需要的敷铜，剩下的导电网路和连接插脚作为仪表板照明灯、报警灯、指示灯和仪表等的电路（见图 1.2-130）。印制电路板固定在仪表板壳体里面，用插座将印制电路板接到汽车线束。



图 1.2-130 用印制电路省去
仪表板背后的大量导线

每当有必要在印制电路板或其周围进行修理时，必须遵守下述注意事项：

- (1) 换灯泡时别刮破印制电路。
- (2) 不要用手摸印制电路，人体体脂中的酸对电路有损害。
- (3) 清洁印制电路板，一定要用清洁电器用的清洁剂。若没有此种清洁剂，用橡皮轻擦表面也能清洁印制电路。

印制电路板简化了线路接线，还用于收音机、计算机和电压调节器等电子电路。

4.1.5 护线器件

适当的护线器件常常被人们忽略，但它们对电气系统却十分重要。利用护线器件保持导线（或线束）合理走向和牢靠定位，以免受损。专用的卡箍、保持架、扎带和辅助绝缘件给导线（线束）提供附加保护，即使它们自身已能提供绝缘。每当进行修理必须拆下这些器件时，一定要重新装上，以免添加电气故障。图 1.2-131 所示为克莱斯勒汽车公司常用的护线器件。

安装额外的护线器件，要做到起码每隔 1ft 便给导线（线束）加以固定。导线穿过车架或车身，要用橡胶孔圈保护导线。

在车架或车身固定导线（线束）时，切勿用金属卡子，



图 1.2-131 典型的护线器件

可能会割透导线的绝缘层，引起对铁短路。

4.1.6 线束

为了使汽车全车繁多的导线不零乱，方便安装和保护导线的绝缘层不被损坏，除高压线以外，都应用棉纱编织或用聚氯乙烯塑料薄带包扎成束，称为线束。一辆汽车按底盘部分和车身部分可以有多个线束。既有简单的线束，如灯光电路线束；也有复杂的线束，如发动机和仪表板线束等。图 1.2-132 和图 1.2-133 所示分别为克莱斯勒汽车公司的复杂线束和简单线束。复杂的线束为许多电路服务，简单的线束只为少数电路服务。有些单根的电导线可以从汽车别的部位的复杂线束分支出来。

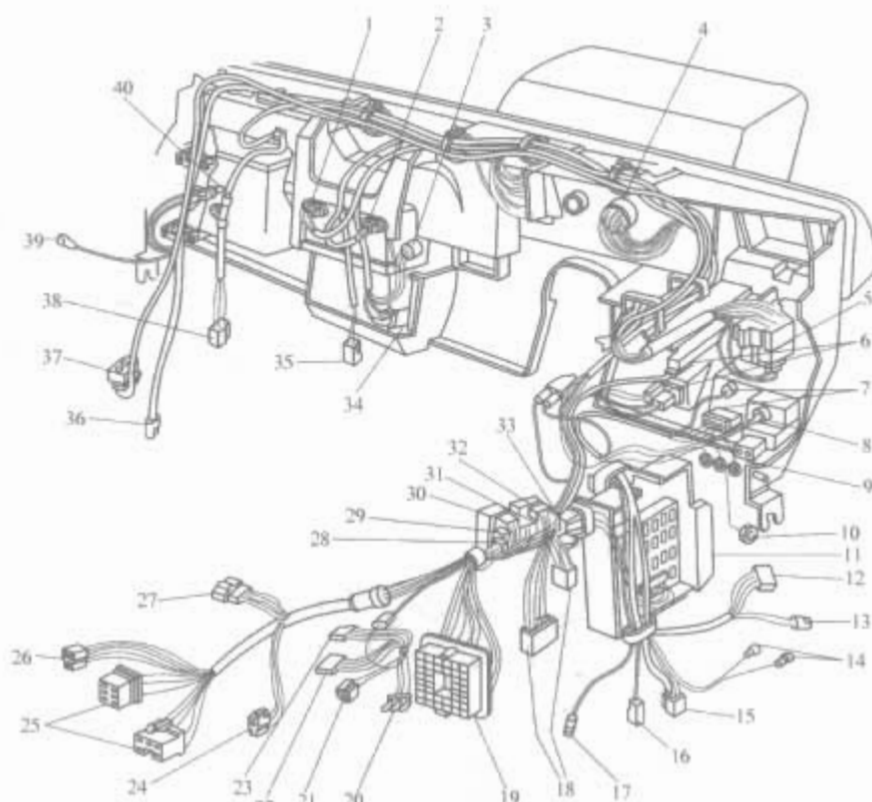


图 1.2-132 复杂的线束

- 1—立体声系统接线；2—收音机接线；3—烟灰盘照明；4—印制线路板接插器；5—灯光开关；6—加热后窗的开关和灯；7—后窗刮水器和洗涤器开关和灯（长车身 M-Z44）；8—灯泡；9—举升门释放（长车身 M-Z24）；10—搭铁；11—熔断器盒；12—接立体声扬声器（MZ24）；13—接左门扬声器；14—接左门踏步灯开关；15—接后窗刮水洗涤；16—接加热后风窗玻璃；17—接天窗释放；18—接车身线束；19—分开的中央可过线的插接器；20—接车速控制伺服机构；21—接车速控制离合器开关；22—接车速控制制动线路；23—接车速控制开关线路；24—接停车灯开关；25—接点火开关；26—接前照灯变光开关；27—接附件灯泡；28—接转向信号开关；29—接间歇式刮水器；30—接点火开关照明；31—接刮水器开关；32—接钥匙照明；33—接忘拔钥匙蜂鸣器；34—点烟器；35—暖风电动机供电；36—接右边前门电阻；37—接空调鼓风机电动机变速电阻；38—接暖风电动机变速电阻；39—接踏步灯开关；40—接杂物箱照明

近年来，为了检修电线方便，国外汽车大多数线束采用一种可以快速装线束的波纹管（见图 1.2-134），此种波纹管开有能扒开的缝，扒开、装入线束后开缝自行合拢，即使将

管弯曲，仍能保持合缝，当然也能取出线束。

4.1.6.1 线束的传统设计

(1) 设计流程。

1) 由电气总布置人员提供整车电气系统的功能，电气负荷及相关的特殊要求。电器件的状态、安装位置，线束与电器件对接的形式。

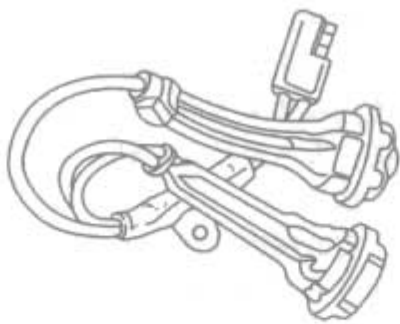


图 1.2-133 简单的线束

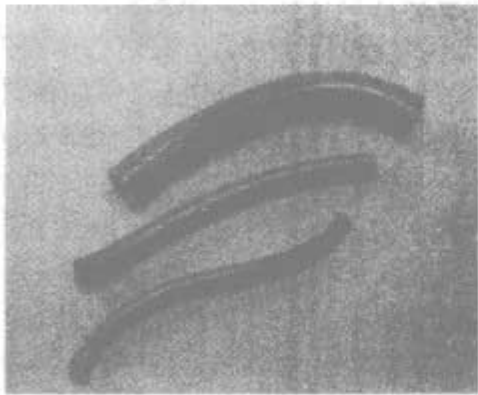


图 1.2-134 装配线束用的开缝波纹管

2) 根据电气功能及要求，绘制整车电气原理图及线路图。

3) 根据电气原理图对每个电气子系统及回路进行能源分配，其中包括电源的搭铁线。

4) 根据各子系统电器件的分布情况，确定线束的布线形式，每根线束连接的电器件及在汽车上的走向；确定线束的外保护形式及过孔的保护；根据电气负荷确定熔断器或断路器；再根据熔断器或断路器的容量，确定导线的线径；根据电器件的功能，依据相关标准确定导线的颜色；根据电器件本身的插接器确定线束上与其对接的端子和护套。

5) 根据整车可装配熔断器及附加熔断器的数量划分各路熔断器所带的负载。并根据负载的容量及形式，确定熔断器的容量（含断路器和易熔线的确定）。

6) 绘制二维线束图和三维线束布置图。

7) 根据经核准的三维线束布置图，校核二维线束图，二维线束图准确无误方可发图，经认可后试制、生产。

(2) 线束设计过程中除要按上述流程进行外，还要考虑如下一些因素：

1) 线束的安全性、可靠性要好。具有可修复性，不可造成热聚积。

2) 电气性能要好，走向尽可能短，只要满足电流负荷及机械强度，可使用更细的导线，以降低线束重量。

3) 尽量远离热源，要防水、耐腐蚀，避免摩擦，易发生碰撞的线段采用软保护。

4) 可生产性要好，比如加防水胶、套胶管要容易。

5) 尽量采用模块化设计，比如，一个子系统尽量要设计到一根线束上。

4.1.6.2 线束设计的具体过程

(1) 整车电源分配及线路保护装置的确定。为了保护汽车的线路和各种电气设备，需要使用各种保护装置，主要有熔断器、断路器和易熔线。这些保护装置在线路短路时立即熔断，防止线束烧坏，起到保护电气部件的作用；在用电设备发生过载时，在一定时间内保护装置断路，也能起到保护电气部件的作用。

1) 熔断器。熔断器一般分为快动作式熔断器和慢动作

式熔断器，两种形式的熔断器其熔断参数差别较大，同一熔断值的不同熔断器所保护的导线线径不同，如 30A 的慢动作式熔断器可保护 3.0mm² 的导线，而 30A 的快动作式熔断器可保护 2.0mm² 的导线。

快动作式熔断器的主要部件是细锡线，它封装在玻璃管、陶瓷管或片式塑料板内，按此封装结构有 3 种形式即玻璃管式、陶瓷管式和片式。其结构见图 1.2-135。片式熔断器结构简单可靠、耐振性好、易检测。

一个熔断器可以只保护一条线路，也可保护很多线路，多的可达 10 条以上。究竟哪几条线路由一个熔断器来保护，其分配的原则为：①同一性质的负载分配到同一个熔断器，即电阻型与电感型的负载尽量避开使用同一个熔断器。如红旗轿车上的几个雾灯都归到一个熔断器来保护，同一侧的后尾灯与前停车灯归一个熔断器保护，功率不大的汽车室内所有灯和牌照灯都由一个熔断器保护，压缩机、继电器和空调电动机等感性负载由一个熔断器保护。②为电控单元提供电能的线路最好使用单独的熔断器，以防止其他负载影响电控单元的工作。③电控单元控制的执行器或传感器所需电能的线路保护，最好不与常规用电器件合用一个熔断器。如喷嘴、炭罐电磁阀、油泵、氧传感器的加热器件、点火线圈等主要电气部件一定要慎重考虑线路的保护措施。红旗 CA7180AE 型轿车就是将前 4 件由一个熔断器保护，后 1 件与发动机电控单元的点火供电合用一个熔断器。

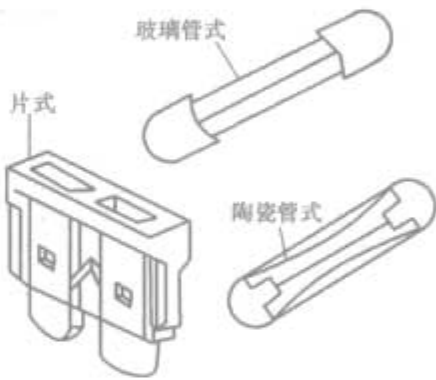


图 1.2-135 熔断器结构

慢动作式熔断器实际上就是锡合金片，其容量的大小决定其结构的厚薄或宽窄。由于其有宽度和厚度，要熔断它需要比快动作式熔断器的时间长。这种结构的熔断器一般串接到感性负载的电路中，如电机电路，而不布置在中央配电盒当中。如果中央配电盒的空间允许也可与快动作熔断器集中到一起，也可将其安装在独立的电源盒内，如红旗轿车的保护水箱风扇电机的熔断器和 ABS 使用的熔断器。

2) 断路器。断路器是一种热敏机械装置，它利用两种金属的不同热变形，使触点开闭，其结构示意图如图 1.2-136 所示。当电路过载时，断路器流过电流增大，温度升高，双金属片弯曲，使触点打开，电路断开。温度降低后双金属片又恢复原状，自动接通电路。

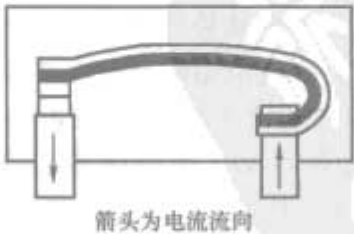


图 1.2-136 断路器结构示意图

新型的断路器用正温度系数的 PTC 固体材料作为过流保护元件，其结构坚固，不易损坏。当电流或温度高于某一特定值时，其电阻呈指数增加，可达几十兆欧，电路内的电流被限制在几十毫安之内，相当于线路断开；当温度降低，PTC 保护片的阻值几乎为零，电路被自动接通。当 PTC 过流保护元件“起跳”后，由本身流过微弱的几十毫安电流使其发热，维持高阻状态。只有当故障排除，等 PTC 过流保护元件冷却以后，元件才能重新接通，避免了反复起跳造成电路的损坏。这种保护元件的最大优势是当故障排除后自动接通，不需人工调节和拆换。但其成本较高，

因此它通常只用于影响行车安全的电路中。例如，前照灯电路就应使用断路器，而不宜使用熔断器。因断路器在电路断开后能自动接通，在意外情况下还能在短时间内，短时或间断地保护前照灯的工作。还有一些电路，如电动座椅、门锁、车窗等，由于其受机械负载的影响，容易造成较大的电流波动，也应使用断路器。红旗轿车在车窗控制电路中就使用了断路器，该断路器具体参数见表 1.2-32。

表 1.2-32 红旗轿车车窗断路器技术参数

额定电流 (A)	切断时间 (s, 2 倍额定电流时)	重新接通时间 (s, 额定电流带载时)
30	14~30	<35
20	8~16	<35
15	10~20	<35
12	6~13	<35
5	5~17	<20

3) 易熔线。易熔线是另一种形式的线路保护装置，它实际上就是一小段标准的铜绞线，其线径通常要比所保护的导线小很多，但在它的表面有比较厚的不易燃烧的绝缘层，所以看起来要比同规格的导线粗。易熔线在它和被保护线路的接头处装有标牌，注明“熔线”，以便于识别。10 年前，易熔线使用的较为普遍，特别是日本车常在蓄电池直接引出的线路中靠近蓄电池敷设易熔线。甚至将熔断器或断路器布置得较隐秘，且认为较重要的线路中敷设两道保护，易熔线为第 1 道，熔断器或断路器为第 2 道。将易熔线敷设在较方便拆卸的位置，让电流先通过易熔线，再通过熔断器或断路器。线路发生过载时，由于易熔线的阻值大于该回路导线阻值，易熔线先熔断，从而保护了线路，也保护了不易拆卸的熔断器或断路器。可见易熔线保护了熔断器或断路器。

4) 熔断器和断路器容量计算及确定。①第 1 种方法。根据每一路用电器的最大连续工作电流计算熔断器的容量。在确定容量时，通常要比计算出的熔断值高出一个等级。如红旗轿车远光灯的功率为 60W，计算出最大连续电流值为 5A，但确定其容量应选为 10A，按此方法逐一将整车的熔断器确定好。②第 2 种方法。根据每一路的最大工作电流来选定熔断器的额定容量，其关系式为

熔断器额定容量=电路最大工作电流÷80%

如红旗轿车的 2 个前雾灯为 55W，1 个后雾灯为 21 W，其最大工作电流为 11A，用此关系式计算出该路熔断器的容量为 13.7A，圆整为 15A。

汽车上有许多感性元件，其自感电动势产生的峰值电流远远超过稳态时的连续工作电流。在选取熔断器时，其容量不应小于最大连续工作电流。如红旗轿车的 25 号熔断器所带的负载为点火线圈（工作电流为 7 A）、节流阀体电动机（工作电流为 4.6A）和微机的工作电源（工作电流为 700mA），计算出最大工作电流为 12A，确定熔断器的容量应取 15A。由于熔断器在短时间内可以承受很高的峰值电流，也就是峰值电流可以在短时间内超过熔断器的容量，因此感性元件回路中选取熔断器额定容量时，自感电动势产生的峰值电流可不予考虑。再以前照灯电路为例，当前照灯第 1 次接通时，由于灯泡温度低，灯丝电阻值小，会产生一个很高的冲击电流，随着温度的升高，灯丝阻值增加，电流减小。因此在确定熔断器的容量时，可以只考虑最大工作电流，忽略第 1 次接通时电流的冲击。

熔断器不仅要保护线束还要保护用电设备，因此选取熔断器的容量值也不要太高。例如，刮水器电路中的熔断器，其值选取如果太高，只能在线路短路时起保护作用。当刮水器摆杆发卡电动机堵转，造成电流过大时，熔断器便起不到保护作用了。

有的国家在线束设计时，还在蓄电池正极与供电线路之间加一个大容量的熔断器，用以保护由于供电线路短路或线束连接有误造成的短路。大容量熔断片要根据具体情况选取不同容量，一般为 50、100、150A。韩国车喜欢采用这种设计思路。

(2) 线束模块化设计的划分及附件的确定。汽车上的电器件几乎遍布于汽车的每个角落，将这些电器件连接起来就靠电线束来体现。电线束在设计过程中如何进行模块化设计，并将走向设计得十分合理；每根电线束所接的电器部件与电气子系统的功能做得协调一致；所用附件选取的正确无误；还将线束的制造工艺体现得正确、完美，这就体现出线束设计师的水平及能力。

1) 中央配电盒。中央配电盒是多功能电子化控制器件。它几乎将全车的熔断器、断路器、继电器集中为一体，可以说它是整车电气、电子线路的控制中心。汽车上安装中央配电盒，做到了集中供电，减少了接线回路，简化了线束，减少了插接件，节省了空间，减轻了整车质量，又降低了线束成本。与中央配电盒对接的线束插接件与其对接的插拔力要求非常严格，保证接触电阻几乎为零。它还有良好的散热、导电、抗干扰、绝缘等性能。由于线束与其对接的护套及端子是专用器件又有颜色加以区别，既不致于造成误插，又能加快生产的节拍，适合集团化、批量化生产。如红旗轿车的中央配电盒，它的设计非常巧妙，在内部有 3 层敷铜板。各层铜板间都有符合要求的绝缘层，各继电器、熔断器及引出端，按线路要求与不同层铜板相连，只要线束与其对接，便可获得电源，也可使信号延续或放大。红旗轿车用中央配电盒的结构及外形如图 1.2-137 所示。

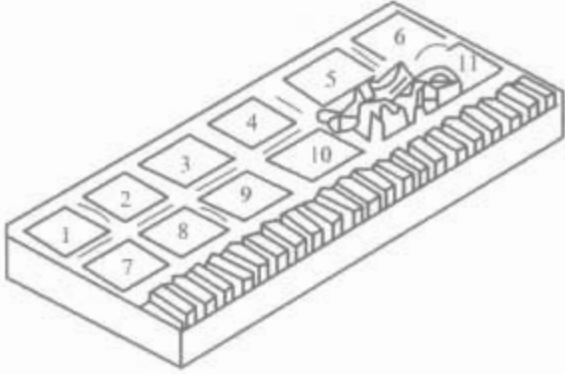


图 1.2-137 中央配电盒结构外形图

2) 确定线束走向、合理分段设计。电线束的分段式设计，就是根据电器件的类型和在汽车上的位置，将电线束分成若干根。因为将整车电器件用一根电线束连接起来的整体设计给制造、装配都带来很多不便，当今世界范围内轿车电线束，一般都设计成 H 形、E 形，简单一些的设计成 T 形，H 形和 E 形的示意图如图 1.2-138 所示。下面举个实例加以说明。

红旗轿车的蓄电池安装在后座椅下面右侧，中央配电盒布置在前挡风玻璃下部水槽内的左侧，起动机及交流发电机安装在机舱内发动机右侧。为将电源系统构成一个整体，将电源电线束由蓄电池开始，经车身地板右侧至前围板内分为 2 支。一支从前围板过孔至发动机舱与起动机电线束和交流发电机线束连接，达到蓄电池与交流发电机的并连，起动机的电源从蓄电池直接供给。在右侧纵梁将这 3 根线束用螺栓

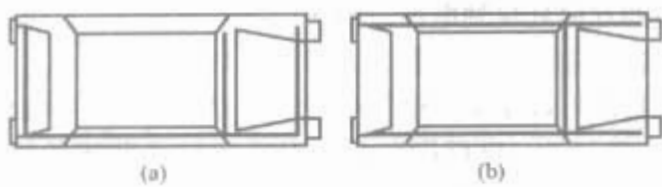


图 1.2-138 线束布置类型
(a) E 形线束布置；(b) H 形线束布置

按规定的拧紧力矩在电源盒里连接为一体，这样可使交流发电机、起动机的线做到最短，线路压降最小。另一支沿前围板向左与中央配电盒相接，为中央配电盒提供电源。按此方法将该线束设计成 T 形结构。

模块化设计的电线束优点很多，如线束的设计图纸简单，易于阅读和绘制；一根线束内导线颜色不易重复，同一根线束中可采用不同方式加以保护；适合批量生产；节省装配工时；某段线损坏更换容易，维修也方便。但采用模块化设计的线束增加了导线间的相互连接，必须将连接端子上的电阻降为最小，插接件间拉拔力要足够大，还要考虑整车的电源分配，如红旗轿车上采用了 T 形支架固定电线束间的对接护套。用中央配电盒合理地将不同类型的电源及信号，通过插接件分配给各个电线束。

3) 选取导线。

a. 根据环境选取导线的类型。线束设计时选用的导线必须考虑其所处的环境及功能。例如，发动机周围环境温度高，腐蚀性气体和液体也很多，此时一定要使用高于 150℃ 的耐高温导线；行李箱盖上的导线要在低温下保持其弹性，要选用冷弹性导线保证低温下正常工作；转向柱上使用的导线一定要耐磨、耐切割、胶合力高；自动变速器上的导线一定要耐液压油、耐高温，其温度稳定性要好，可在 -55~150℃ 环境温度下正常工作，甚至有的还要在导线线心内充满硅材料，防止毛细现象；增压发动机上传感器一定要使用耐 200℃ 高温的导线。ABS 总成线要使用耐 150~200℃ 高温、外保护绝缘层硬、耐磨、但线芯要大于 133 根的胶合导线，以便增加线体的柔韧性；制动蹄片线由于其处在车轮附近，经常遭到泥水、沙石的飞溅，必须使用外部有较厚、耐磨的橡胶材料的导线。还有一些特殊导线，如动力线即起动机线、交流发电机输出线、蓄电池线，由于其功能的特殊要求，必须承受大电流，所以要求其绝缘层的散热性好。特别是起动机、交流发电机都处在发动机舱内的高温环境下，离排气管又近，要求其绝缘层一般要达到耐 200℃ 高温，甚至更高。导线上的电压降还要求相当低，为满足这么多的性能要求，一般都采用特殊导线。汽车上的电控产品增加，微弱信号增多，为保证数据传递的可靠性，一般是采用屏蔽线加以保护。传统的屏蔽方法是在导线外加一层编织线，但也只能防止 100MHz 以下频率的干扰源。现在已有新的防干扰屏蔽线诞生，新型屏蔽导线在铜胶合外层多加了一层高分子滤波线层，再外层才是编织层。其原理是靠分子相互运动将高频干扰波作为能量吸收，再变成热量散发出去。一般的干扰由外层的屏蔽线起作用，高频段的干扰由滤波线层起作用。要防止电磁干扰对微弱信号的影响，在设计过程中有两种因素必须加以考虑：①对屏蔽线路要做到整体屏蔽，即屏蔽要连续；②要对整个回路加以屏蔽，即信号的正、负端都要屏蔽，而且正、负信号线还要作在一个屏蔽层中，所以一般都采用两芯或更多芯线的屏蔽线。

b. 选取导线截面积。根据表 1.2-26~表 1.2-28 按照加载后产生的电流进行选择。这就要求在小的电压降和轻的线

束质量之间作出最佳选择。国外一些厂家经过大量试验总结出了各种电路的电压损失，在线束设计时作为确定导线截面积的参考，甚至是计算的依据。表 1.2-33 给出了 12V 电系典型电路允许最大电压损失的相关参数。如果系统使用 24V 电压系统，则表中的值应增加 1 倍。

表 1.2-33 典型电路允许最大电压损失 (12V 电系)

电 路	负 载	线路最大电压损失 (V)	端子和线路最大电压损失 (V)
灯电路	<15W	0.1	0.6
	>15W	0.3	0.6
充电电路	额定值	0.5	0.5
起动电路	最大在 20℃	0.5	0.5
起动线圈	输入端	1.5	1.9
其他电路	额定值	0.5	1.5

c. 选取导线颜色。根据表 1.2-29~表 1.2-31 选取导线的颜色，选用顺序以单色线为主，选用双色线时以组序在前的为优先级。

4) 选取插接件和护套。绝缘护套的作用：①将插接件进行绝缘；②利用护套的限位自锁对插接件定位，防止对接时插接件产生轴向运动；③保证与电器件的良好对接。护套既可与电器设备对接，又可相互连接。

线束上护套的结构要根据电器件的护套及其所处的环境，选择合理的密封形式；在没有对护套固定的位置处，还必须考虑使用带有挂接结构的护套。如与发动机舱内电器件对接的护套，应选择带防水橡胶密封塞的。防水的形式是用整体式的还是用单孔式的取决于电器件的结构。由于单孔式较整体式防水橡胶密封塞的护套有更大的优越性，它对单根电线进行密封可使装配及维修更加灵活、可靠性也大大提高。在条件差的环境中应优先选用此种护套。而在驾驶室对接的护套，可不必采取防水措施。

线束与线束对接还要根据位置及固定方式合理选择护套结构。

选用同一种护套时其颜色一定要有区别，特别是在同一根线束中选择同种类型的护套是不可避免的，但如果使用颜色加以区分会给线束的制造、装配和维修带来很大的方便。此外，线束与线束对接的一对护套一定要选用相同的颜色，避免装配和维修时出现对接错误。在中央配电盒上集中了大量的对接护套，为设计中央配电盒接口的方便并满足规范的要求，中央配电盒与线束对接的护套只设计了很少的几种规格。为避免线束与其对接时发生混淆，同一种护套便采用不同颜色加以区分，这样就解决了制造和装配间的矛盾。另外基于汽车外观的整体协调性，在发动机舱内应优先选用黑色或深色的护套。

选择插接件时主要是根据选用的护套进行匹配。设计时应注意以下几个问题：①插接件要优先选择接触电阻非常小的双弹簧式的结构；②保证插接件与护套间的合理匹配；③针对压接电线的截面积选择合适的插接件；④对于单孔橡胶密封塞的护套，要选择尾部能压接橡胶密封塞的插接件。

汽车线束上有许多搭铁用的圆形孔式端子或插接件，还有不带护套的裸露端子或插接件。处理方法是在压接或焊接前将热缩管套入导线，插接件与导线压接或焊接后将热缩管套入插接件的尾部，再将热缩管加热，加热后的热缩管便被激活其“形状记忆”，即回复到扩展前的小管径尺寸，而且在热缩管的内壁有一层胶，胶层及小管径的热缩管便将裸露的插接件和导线绝缘封成一体，保证了线束的品质。

5) 电源的搭铁设计和导线的集中压接。电源的搭铁设计是非常重要的，它直接影响着信号的正常传递，如果搭铁不合理可能会造成信号的干扰或减弱，影响某些电器的功能实现。根据车型不同设计成多个接地点，一般情况下，控制器与为控制器服务的传感器的搭铁，不应与汽车常规电器件、特别是汽车上的电感器件的搭铁合为一体。弱信号传感器的搭铁最好独立，搭铁点最好是在离器件较近的位置，以保证信号的真实传递。

带有绝缘漆层的搭铁位置一定要加以去漆处理，最好在车身钣金件上焊接排式的焊接螺母，多根线束的搭铁都可在此处连接。这样即解决了多处搭铁零乱的问题，又解决了多处搭铁位置对绝缘漆层进行处理的复杂工艺。这种处理方式有可能出现线束搭铁的引出点不十分合理

的现象，这些相互矛盾的问题可根据具体情况采取不同的搭铁处理方式。

线束在设计过程中导线的集中压接绝不能忽视。压接点的选择第一要满足线路原理的要求；第二要考虑线束的分支是否从此压接点处经过；第三还要考虑导线的走向，应以最短为宜。线束内部压接还要在压接处加以保护，对于要求严格的线段，压接后用热缩管塑封。

6) 导线的外保护。导线组成电线束后的外保护有多种多样的结构形式：①最普遍的一种是使用 PVC 胶带将线束捆扎起来，这种结构具有柔性，便于布线，一般在仪表板及弯脚较多的地方使用。②采用塑料黏接将导线一根一根排起来，将线束作成扁平结构，易于穿过狭窄区域，如地毯下或内饰里。③将线束放在 PVC 套管内，此结构的最大优点是耐磨，如果密封胶的效果好还起防水作用。这种结构的线束一般使用在发动机舱内，如在高温热源附近还应使用耐高温的 PVC 套管。

图 1.2-139 为红旗轿车整车的线束布置示意图，该示意图并不能完全体现线束的复杂程度，因为线束之间和线束与器件之间的连接并未给出。

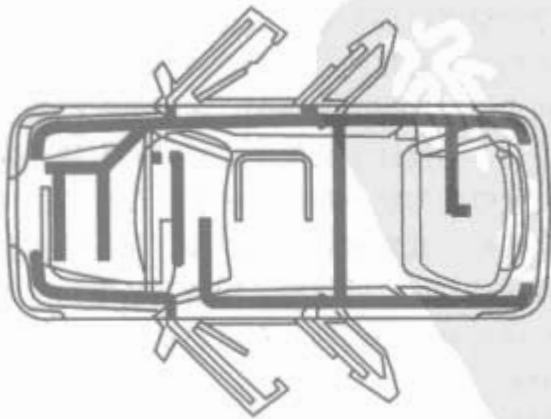


图 1.2-139 红旗轿车整车线束布置示意图

4.2 电路图

电路图是技师查找电气问题的重要工具，学会使用电路图将减少查找导线所花的时间。电路图上标出电路的相互关

系、电路在何处接到电源、用什么颜色的导线等是供技师作准确诊断所需的补充材料（见图 1.2-140）。

电路图可以是整车电气电路，或者只是一个系统的电路（见图 1.2-141）。电路图包括所有表示导线路径的插接器。电路图上还应标注所用导线的颜色代号。

4.2.1 电气符号

大多数车间用书在电路图上不使用电路中各部件的实际图形，而是代之以电气符号。表 1.2-34 为克莱斯勒汽车公司汽车电路中使用的各种符号。表 1.2-35 为国外主要汽车厂说明书中电路图所使用的各种符号。熟悉汽车维修手册中所用的各种电气和导线符号对于正确分析电路非常有用。

表 1.2-34 克莱斯勒汽车公司汽车电路图中所用的电气符号

图形符号	名 称
+	正的
-	负的
*	搭铁
	熔断器
	电路断路器
	电容器
Ω	欧姆
	电阻
	可变电阻
	串联电阻
	线圈
	抽头线圈
	动合触点
	动断触点
	动合开关
	动断开关
	动断的组合开关
	动合的组合开关
	单刀双掷开关
	压力开关
	电磁开关
	水银开关
	二极管或整流器

续表		续表	
图形符号	名 称	图形符号	名 称
	双向稳压二极管		双丝灯泡
	插接器		LED 发光二极管
	插头		热敏电阻
	插座		表头
	多孔插接器		时钟
	表示导线往别处延伸		电动机
	结点		电枢和电刷
	结点识别		表示导线通过孔圈
	有接线 无接线		表示导线通过 40 路分开的插接器
	热元件 双金属带		表示导线通过 25 路转向柱插接器
	“Y” 绕组		表示导线通过 25 路仪表板插接器
	数字读出装置		
	单丝灯泡		

表 1.2-35 国外一些主要汽车厂说明书中所用的电气符号

图形符号	名 称	图形符号	名 称	图形符号	名 称
	电阻		可拆的导线插接器		焊接或熔接的线接头
	可变电阻		半导体二极管		导线横截面（线规）
	电动阀		电磁继电器		钮子或挠板开关
	火花塞		交流发电机		液压开关
	灯泡		电动机		固体继电器
	熔断器		可拆的导线接点		热敏（双金属）开关
	多丝灯泡中的一根丝		导线交叉不连接		手动多位开关
	热元件		永久性的导线接点		固体电路
	机械操纵开关		蓄电池		手动开关
	表或表头		屏蔽的导线		喇叭
端子数字代号 30—来自蓄电池的电源，一直工作 15—当点火开关接通时给电源 50—仅当起动机工作时给电源 X—当点火开关接通时给电源，当起动时电源关闭 31—搭铁		颜色代号 黑—BK 浅绿—LT.G 棕—BR 蓝—BL 透明—CL 紫—V 红—R 灰—GY 黄—Y 白—W 绿—G		导线连接代号 T1—单点 T2—双点 T3—3 点 T4—10 点 T5—18 点	

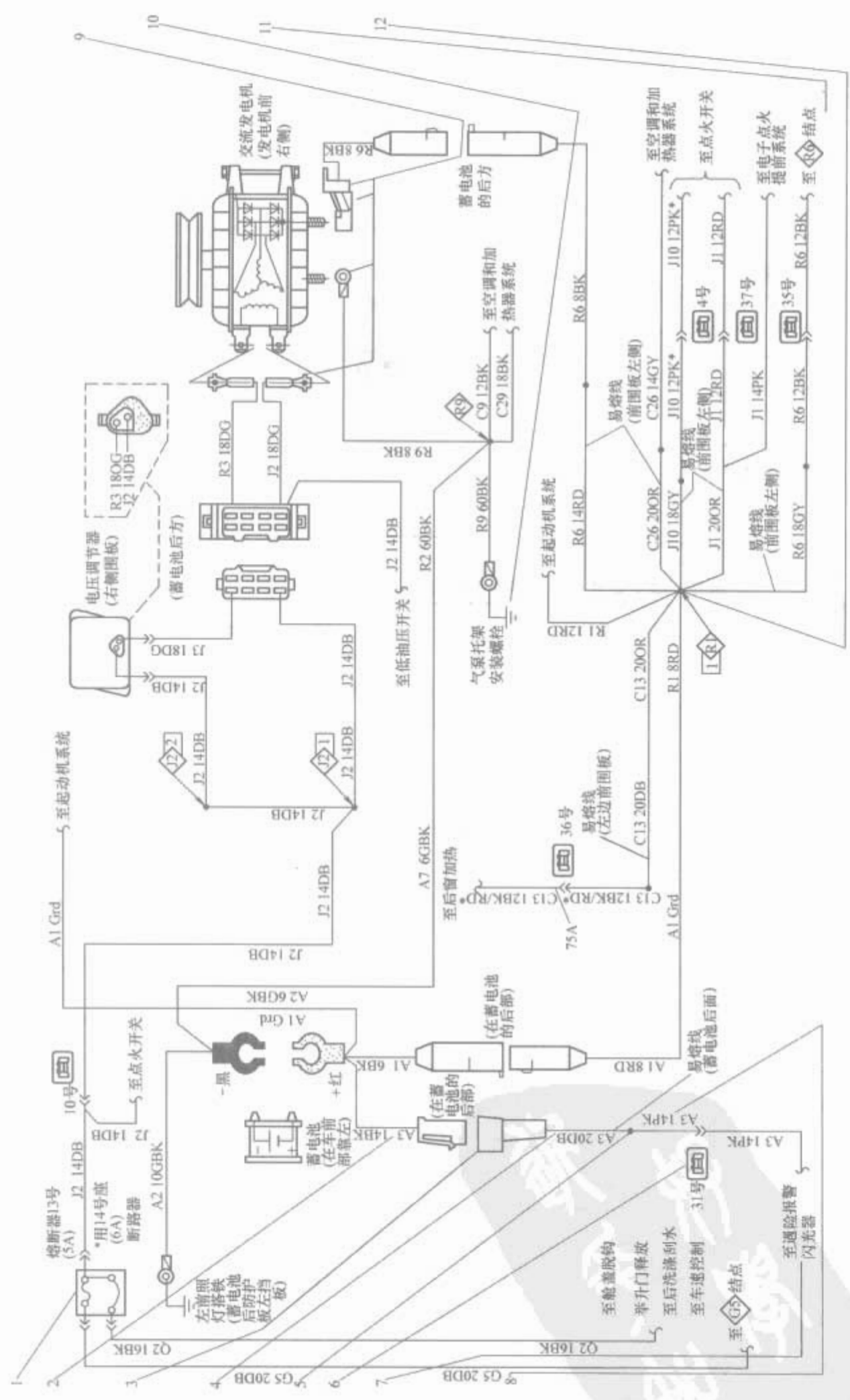


图 1.2-140 电路图为技师提供准确诊断电气系统所需的资料

1—熔断器（给出熔丝的安培数和它的座位号）；2—电路识别代号（包括电路代号、线规号和导线颜色代号，此处“A”表明此导线是馈电线，14是线规号，BK表明是黑色的导线，你可以追踪此黑色导线到哪儿）；3—单孔插接器（其旁边的文字说明了此插接器所处的位置）；4—易熔线（线规号为20、颜色为深蓝色，它位于线规号为14的导线和线规号为14的粉红色导线之间）；5—接点符号（表示这是导线和易熔线的接点）；6—中央可过线的插接器符号（粉红色导线往插接器的31号孔）；7—电路去向（A3电路的其余部分在哪一页的线路图上）；8—电路代号（表示追踪色条符号“*”而不是它的颜色代号，此处要寻找一根在粉红色条上加有追踪色条的14号线，该追踪色条的颜色将是黑色的或白色的）；9—部件和插接器位置（导线与部件分离，表示插接器或部件是接到该部件的）；10—搭铁符号（表示在车身或发动机上搭铁）；11—电源馈电电路资料（可以从此处指出的页次追踪馈电电路，也可以通过查对其他页的电路找回到此点）；12—结点符号（表示所有这些导线均接到R1-1馈电电路的结点）

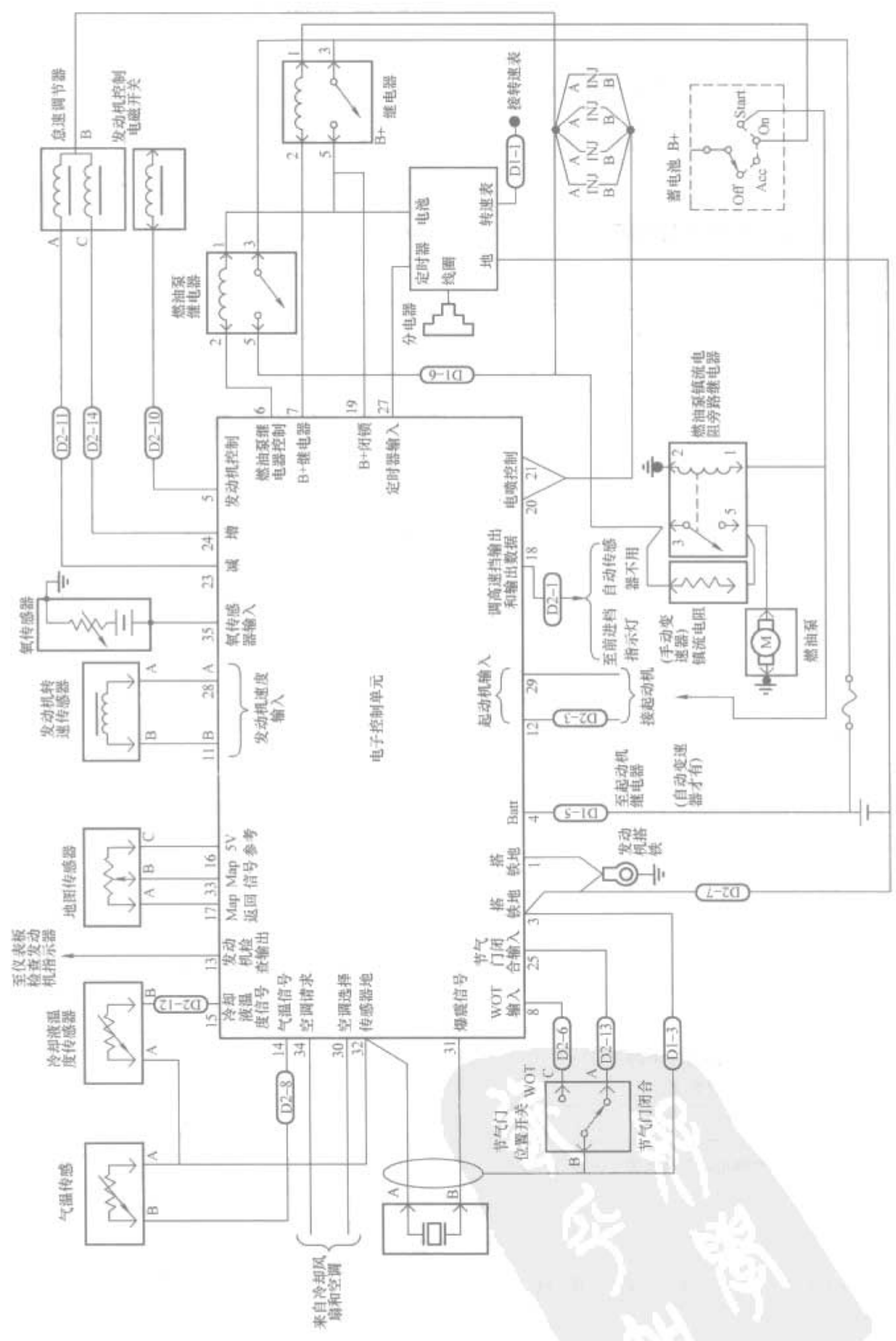


图 1.2-141 只表达特定电路的电路图

4.2.2 导线颜色代号和电路编号

为了容易追踪导线，采用了颜色代号和电路编号，但不是所有的汽车厂都用一样的导线标注法，在大多数车间用书中的电路图上列出的是该汽车厂的导线标注法，因此技师持有修汽车厂家的导线颜色卡是一件重要的事情。

关于国内汽车导线的规格及颜色前文已述及。国外在导线颜色的标注上与国内类似，第一组字母指定导线绝缘表面的基色，第二组字母指出追踪色条的颜色。例如，导线被指定为 WH/BLK，表示将有一白基色加有黑色的追踪色条。

福特汽车公司用四种方式规范导线的颜色（见图 1.2-142）：

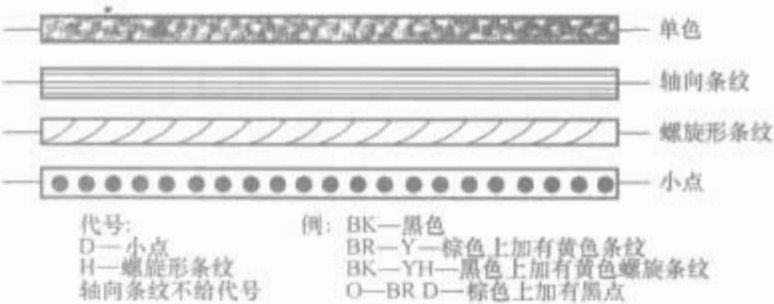


图 1.2-142 福特汽车公司用四种方式规范其导线颜色

- (1) 单色。
- (2) 基色上加条纹（追踪色）。
- (3) 基色上加螺旋条纹。
- (4) 基色上加小点。

图 1.2-143 所示为克莱斯勒汽车公司电路图所用的标注法。电路标识、导线线规和颜色均含于电路号码中，第一组数字和字母是主电路标识代号，其含义见表 1.2-36。

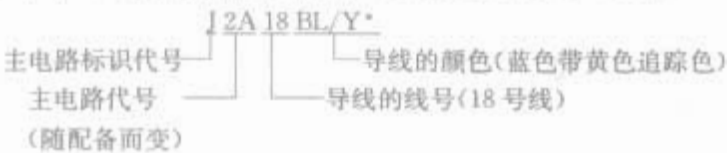


图 1.2-143 克莱斯勒汽车公司用的线路标注

通用汽车公司采用以米制毫米的导线规格、导线颜色缩写、电路号、接头号和搭铁号等标注电路。例如，图 1.2-144 中，电路被指定为 100、导线规格为 0.8mm²、导线绝缘表面颜色为黑色、接头号为 S114、搭铁号为 G117。

表 1.2-36 克莱斯勒汽车公司电路标注中的主电路标识代号的含义

代号	含 义
A	蓄电池馈电（即易熔线馈电、起动机馈电、起动机继电器馈电）
B	制动
C	气候控制（空调、暖风、鼓风电动机和加热的后视镜等有关电路）
D	诊断电路
E	变光的照明电路
F	熔断器电路（非专用的多系统馈电）

续表

代号	含 义
G	监控电路（仪表、时钟、警报装置）
H	（待定）
I	（不用）
J	（待定）
K	发动机逻辑组件控制电路
L	外部照明电路
M	内部照明电路（乘员舱灯、门灯、点烟器灯）
N	ESA 组件电子电路
O	（不用）
P	选装的电动装置（蓄电池馈电）（即座椅、门锁、后视镜、发动机舱盖释放，等等）
Q	选装的电动装置（点火开关馈电）（即门窗、电动顶盖、电动遮阳板等）
R	被动约束系统
S	悬架系和转向系电路
T	变速器/驱动桥、差速器、分动器和起动机等系统的电路
U	（待定）
V	车速控制和洗涤刮水电路
W	（待定）
X	音响系统（即收音机和喇叭）
Y	（待定）
Z	搭铁（B—）



图 1.2-144 通用汽车公司的电路和导线标注法

4.2.3 部件设置图表

大多数使用说明书中的电路图不指出电路部件在车上的确切位置。有的车间手册给出一种“部件设置图表”，能用来找出部件在车上的安装位置。部件设置图表，用图和文字说明，指引技师找到要找的部件，如图 1.2-145 所示。

许多电器部件可能藏在前围板、仪表板、防护墙等的后面。利用“部件设置图表”会节约技术寻找怀疑有故障部件的时间。

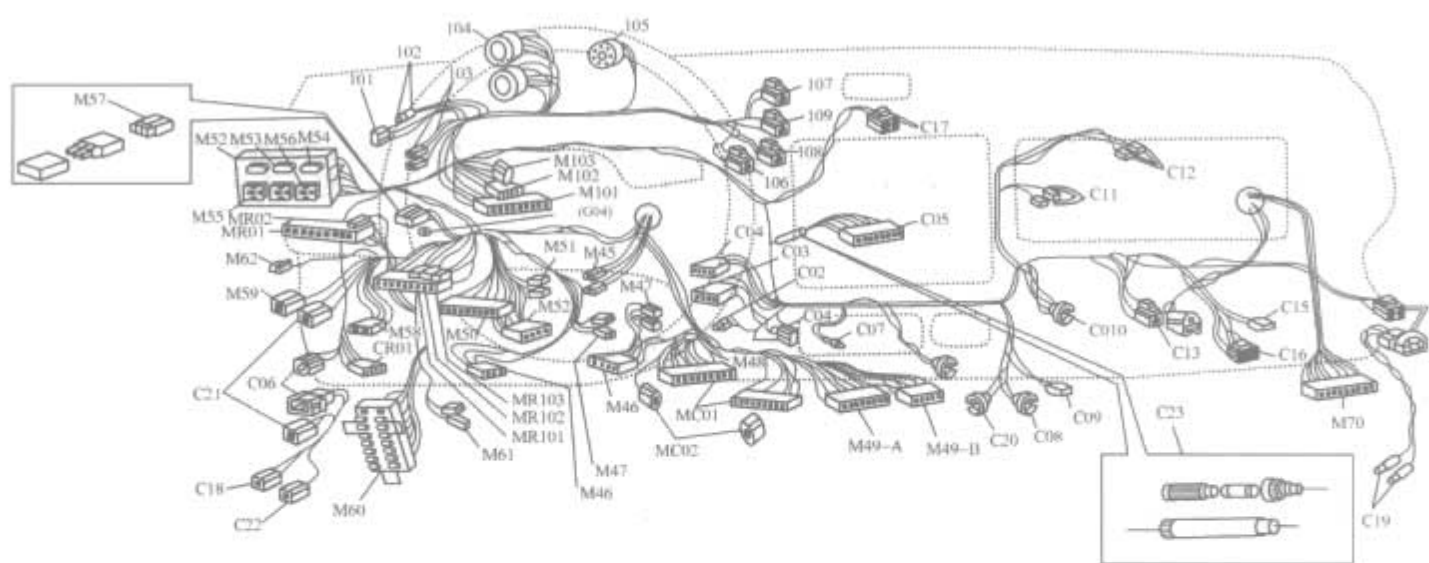


图 1.2-145 本田汽车公司用来寻找部件实际位置的部件设置图

M45—停车灯开关；M46—安全带定时器；M47—发声器；M48—二极管连接器；M49—F、B、C 单元；M50—组合开关；M51—车门联动开关；M52—点火开关继电器盒；M57—二极管连接器；M58—加热定时器；M59—门灯延长线；M60—熔断器盒；M61—后门开启开关；M62—遮阳板延长线；M70—锁定控制单元；101—除霜器开关；102，106—仪表照明灯；103，104，105—仪表；107—空调器开关；108—后窗刮水开关；109—后窗洗涤开关；M101，M102，M103—仪表延长线插接器；C01—变阻器开关；C02—变阻器和间歇刮水器照明灯；C03—间歇刮水器继电器；C04—送风机开关；C05—音响；C06—左、前门扬声器延长线；C07—烟灰盘照明灯；C08，C09—点烟器；C10—加热器调节器照明开关；C11—杂物箱开关；C12—杂物箱灯；C13—空调器延长线；C14—右、前扬声器延长线；C15—鼓风电动机；C16—加热器电阻；C17—数字钟；C18—左、前门扬声器；C19—右、前门扬声器；C20—后门开门开关；C21—安全带延长线；C22—安全带开关；C23—收音机保险丝；CR01—后扬声器延长线；MR01，MR02—后线插接器

第3章 动力传动电气控制系统

随着人们对汽车舒适、便利、豪华等方面要求的不断提高,使用传统的机械控制系统已不能使汽车的性能得到进一步的改善和提高,而计算机技术与微电子技术的迅速发展,为解决上述问题的提供了技术基础和保障,汽车电子技术使汽车工业进入一个全新的时代。

目前,汽车电子技术已经广泛应用于汽车的发动机控制、底盘控制、车身控制、故障诊断以及音响、通信、导航等各个方面。汽车电子化的程度逐年增加,被认为是汽车技术发展进程中的一次革命。汽车电子技术在汽车控制精度、范围、适应性和智能化等方面有了较大的发展,实现了汽车的全面优化运行。

发动机的电控技术可以说是汽车技术与电子技术相结合的重要体现。由于采用了电子综合优化控制,与传统的化油器发动机相比,可以节约燃油消耗 10%~15%。汽车是一个较复杂的多参数控制的机械系统,而且行驶条件随机变化。采用电子控制后,计算机可以对控制对象的有关参数(如温度、气体压力、转速、排气成分)进行适当采样,然后进行数据处理,最终控制汽车的执行机构,这样可使汽车在最佳工况下工作,以达到节油的目的。用传感器控制的发动机空燃比闭环控制系统,可以保证发动机处于理论空燃比附近工况工作。若加装废气再循环和三元催化器电子控制系统,不但可以节约燃油,而且废气中碳氢化合物的体积分数可降低 40%,氮氧化物的体积分数可降低 60%左右。汽车发动机电控技术在当今汽车生产中的应用已经非常普遍,它可以实现低油耗、低污染,减小动力传递系统的冲击,减轻驾驶员的疲劳,提高汽车的动力性、经济性和舒适性。

随着计算机与电子技术在汽车动力传动系统中应用范围的不断扩大,给汽车工业开辟了崭新的研究领域。

1 汽车发动机控制系统

1.1 汽车发动机控制系统简介

汽车发动机控制系统广泛采用集中控制系统,其子控制系统主要包括电控燃油喷射系统、电控点火系统和其他辅助控制系统。

1.1.1 电控燃油喷射系统

在电控燃油喷射(EFI)系统中,喷油量控制是最基本的也是最重要的控制内容,电子控制单元(ECU)主要根据进气量确定基本的喷油量,再根据其他传感器(如冷却液温度传感器、节气门位置传感器等)信号对喷油量进行修正,使发动机在各种运行工况下均能获得最佳浓度的混合气,从而提高发动机的动力性、经济性和排放性。除喷油量控制外,电控燃油喷射系统还包括喷油正时控制、断油控制和燃油泵控制。

1.1.2 电控点火系统

电控点火系统(ESA)最基本的功能是点火提前角的控制。该系统根据各相关传感器信号,判断发动机的运行工况和运行条件,选择最理想的点火提前角点燃混合气,从而改善发动机的燃烧过程,以实现提高发动机动力性、经济性和

降低排放污染的目的。此外,电控点火系统还具有通电时间控制和爆燃控制功能。

1.1.3 怠速控制系统

怠速控制(ISC)系统是发动机辅助控制系统,其功能是在发动机怠速工况下,根据发动机冷却液温度、空调压缩机是否工作、变速器是否挂入挡位等,通过怠速控制阀对发动机的进气量进行控制,使发动机随时以最佳怠速转速运转。

1.1.4 排放控制系统

其功能主要是对发动机排放控制装置的工作实行电子控制。排放控制的项目主要包括废气再循环(EGR)控制、活性炭罐电磁阀控制、氧传感器和空燃比闭环控制、二次空气喷射控制等。

1.1.5 进气控制系统

进气控制系统的功能是根据发动机转速和负荷的变化,对发动机的进气进行控制,以提高发动机的充气效率,从而改善发动机的动力性。

1.1.6 巡航控制系统

驾驶员设定巡航控制模式后,ECU根据汽车运行工况和运行环境信息,自动控制发动机工作,使汽车自动维持一定车速行驶。

1.2 汽油喷射系统的组成与工作原理

1.2.1 汽油喷射系统的结构组成

各种发动机的燃油供给系统基本相同,都是由空气供给系统、燃油供给系统和控制系统三个子系统组成的。

1.2.2 汽油喷射系统的分类

汽油喷射系统种类很多,但总的说来可按特征来分类:

(1) 按控制型式分。

1) 机械式汽油喷射系统(K型系统)。机械式汽油喷射系统燃料的计量是通过机械与液力传动实现的,其主要特征是空气计量器与燃油量分配器组装成一个混合调节器。

2) 机电混合汽油喷射系统(KE型)。机电混合汽油喷射系统是在机械式汽油喷射系统基础上发展起来的一种变形。它基本上是机械控制,与机械式汽油喷射系统不同的是,它在系统中增设了一个电控单元和若干传感器,以提高控制系统的灵活性和扩大功能。

3) 电子控制汽油喷射系统(EFI)。电子控制汽油喷射系统燃油的计量是由电控单元及电磁喷油器实现的,它又可分为D形系统和L形系统两种。

(2) 按喷射系统执行机构分。

1) 多点喷射。指在每个汽缸盖上安装一个喷油器,直接将燃油喷到进气道内进气门前方。

2) 单点喷射。指喷油器安装在节气门前的区段内(原化油器位置),燃油喷入后与空气流混合并随之进入进气歧管内。

(3) 按喷射方式分。

1) 多点间隙脉冲喷射式。所有的缸内喷射和多数多点喷射均采用多点间隙脉冲喷射式,喷射是在进气过程中进行

的,用喷射持续时间的长短来控制喷油量的多少。

2) 单点间隙脉冲喷射式。

指以一定的喷射压力,通过控制喷油器的喷射持续时间来控制喷油量的大小,以适应与发动机工况,隔一定时间喷射一次。

3) 连续稳定喷射式。指以一定的喷油压力,通过流量调节器的槽孔开度来控制喷油量。槽孔开度越大,喷油量多。喷油量的大小与发动机工况相适应,只要发动机工作就能不断地喷射。

(4) 按喷射位置分。

1) 缸内喷射。与柴油机供油系相似,将汽油通过高压直接喷入汽缸内。不过,由于汽油黏度低,要形成 4kPa 的高压相当困难,不仅制造成本高,且可靠性差,但效果较好,故二冲程汽油机采用缸内喷射。

2) 缸外喷射。指将汽油通过高压直接喷入汽缸进气门附近。四冲程汽油机多用缸外喷射。

1.2.3 汽油喷射系统的工作原理

电控汽油喷射系统按喷油器数量(喷油方式)分为多点式(MPI)和单点式(SPI)两类。多点式即是在每个汽缸设置一个电磁喷油器,单点式即是在进气管的节气门前方设置一个(或并列两个)喷油器,对各缸实行集中供油。电控多点式汽油喷射系统已被广泛使用,而单点式电控汽油喷射系统是在多点式汽油喷射系统基础上发展起来的。

L形电控喷射系统是一种广泛应用的多点式汽油喷射系统,其结构原理如图 1.3-1 所示。它是将各种传感器感应采集的信号送入一个电控单元(ECU)中,根据发动机各种工况的实际需要来控制喷油量。此系统是用间隙式的喷油方式。混合气的空燃比用微机控制。当电控单元的电流流经喷油器内的电磁线圈时,喷油器开启把燃油喷入进气管内,与吸入的空气混合后进入其汽缸内燃烧,产生动力。微机的主要功能是控制喷油器的喷油量,而吸入的空气量由节气门开度来确定。L形汽油喷射系统具有以下三个特点:

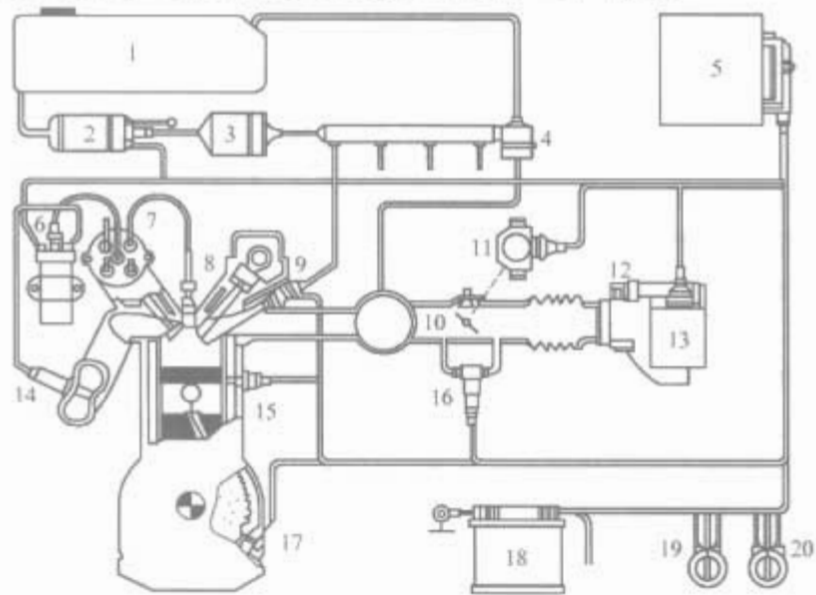


图 1.3-1 L形电控喷射系统

- 1—油箱;2—燃油泵;3—燃油滤清器;4—调节器;5—电子控制单元;6—点火线圈;7—分电器;8—火花塞;9—喷油器;10—节气门;11—节气门伺服电动机;12—空气流量计;13—空气温度传感器;14—氧传感器;15—冷却水温度传感器;16—怠速控制阀;17—发动机转速传感器;18—蓄电池;19—点火起动开关;20—空调调节开关

(1) 采用空气流量传感器,以空气流入量作为控制基础。

(2) 以空气流量与发动机转速作为控制喷油量的基本

因素。

(3) 系统还接受节气门位置、冷却水温、空气温度等传感器检测到的表征发动机运行工况的信号作为喷油量的校正,使发动机稳定运转。

1.3 喷油量的确定与控制

汽油喷射量的控制包括喷油正时控制、喷油持续时间控制和断油控制三方面的内容。

1.3.1 喷油正时控制

喷油正时控制是指 ECU 对喷油开始时刻的控制,在间歇汽油喷射系统中,喷油正时控制有同步喷射和异步喷射两种控制方式。

(1) 同步喷射方式。喷射的开始时刻与曲轴的转角位置有关,ECU 根据曲轴的转角位置信号输出喷油脉冲信号,在固定的曲轴转角开始喷油。在发动机运转的过程中,同步喷射始终在进行。

(2) 异步喷射方式。喷射的开始时刻与曲轴的转角位置无关,ECU 根据需要给出异步喷射的信号或过程,输出喷油脉冲信号。因此,异步喷射方式是一种临时的补偿性喷射,是同步喷射的补充。发动机处于冷起动、加速等非稳定工况时,电控汽油喷射控制系统除了同步喷射外,还增加异步喷射,以对同步喷射的喷油量进行增量修正。

1.3.2 喷油持续时间控制

在电控汽油喷射控制系统中,要使发动机在各种工况下都处于良好的工作状态,必须精确地计算基本喷油持续时间和各种参数的修正量,其目的是使发动机燃烧混合气的空燃比符合要求。根据发动机的运转情况和控制要求,喷油持续时间控制分为发动机起动时的喷油持续时间控制和起动后喷油持续时间控制。

1.3.2.1 发动机起动时喷油持续时间控制

发动机起动时,由于发动机的转速变化很大,无论是进气歧管绝对压力还是空气流量计,都无法准确测出实际的进气量。因此,发动机起动时,ECU 不能用实际进气量来计算喷油量,而采用另外的喷油量控制方式。根据起动时发动机的热状态,又分冷起动时的喷油持续时间控制和高温起动时的喷油量控制。

(1) 冷起动时的喷油持续时间控制。发动机起动时,基本喷油持续时间是由发动机冷却水的温度确定的,两者之间的对应关系已制成数据表预先储存在 ROM 中。ECU 根据冷却水温度从数据表中找出相应的基本喷油持续时间,然后再根据进气温度、蓄电池电压对基本喷油持续时间进行修正,得到冷起动过程实际的喷油持续时间。大多数电控汽油机起动时的喷油正时控制都采用同步喷射方式,喷油正时与曲轴转角的对应关系固定不变。有些电控汽油机为防止一次喷油量过多造成火花塞浸湿,对冷起动时增加的喷油量采取异步喷射的方式补充,以保证发动机有良好的起动性能。

(2) 高温起动时的喷油量控制。在夏季高温时节,汽车在高速行驶后停车 10~30min 再次起动时,由于发动机散发的热量对汽油的加热作用,会使汽油温度上升至 80~100℃,此时喷油器内的汽油会沸腾生成大量汽油蒸气,实际喷油量因汽油中含有油蒸气而减小,造成起动时混合气过稀,出现高温下起动困难的情况。为此,电控系统必须采取高温油量修正措施,以改善电控汽油机的高温起动性能。在大多数电控汽油机中,ECU 根据冷却液温度确定是否进行高温起动油量修正(一般设定值为 100℃)。在有些专门配

置汽油温度传感器的电控汽油机中，ECU 根据汽油的温度确定高温起动时是否进行喷油量修正。

1.3.2.2 发动机起动后喷油持续时间控制

发动机起动后，一般当发动机转速大于 50r/min 时，ECU 即认为起动过程结束，电控系统进入起动后喷油持续时间控制程序，ECU 按循环空气质量及目标空燃比决定喷油量的控制原则，对实际喷油持续时间进行控制。

实际喷油持续时间与循环进气量、发动机的运行状态、发动机的热状态、反馈信号及蓄电池电压等因素有关，可表示为

$$T = T_p F_c + T_v$$

式中：T 为实际喷油时间，ms； T_p 为基本喷油持续时间，ms； F_c 为综合修正系数； T_v 为电压修正值。

1.3.3 停油控制

停油控制是指发动机运转期间，为防止出现某种可能危及安全或对环境造成危害的情况，ECU 暂时停止向输出回路发送喷油脉冲信号；当使 ECU 做出停油判断的情况消失后，ECU 将恢复对发动机的供油。在电控汽油机中，出现以下两种情况时，ECU 将对发动机实施停油控制。

(1) 减速停油控制。发动机在高转速运行时突然减速，发动机处于强制怠速工况，这时汽车依靠本身的动能滑行，不需要发动机输出功率。另外，由于节气门突然关小，进气量迅速减少，而进气歧管真空度提高，汽油的蒸发速度加快，造成混合气短时过浓，发动机排放性能变坏，从节约能源、提高发动机燃油经济性和减少有害物排放的目的出发，当出现上述情况，且发动机的转速高于该运行状态的设定值时，ECU 执行减速停油控制，停止向发动机供油。当发动机转速高于该发动机的运行状态相对应的怠速转速，或者节气门重新打开时，ECU 才恢复向发动机供油。停油控制转速和恢复供油的转速，取决于冷却水的温度、空调是否工作、其他用电器工作情况等因素。停油和恢复供油转速与冷却水温度的对应关系如图 1.3-2 所示。

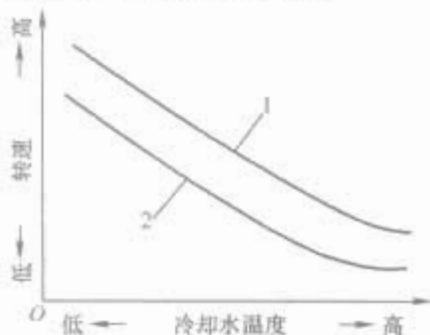


图 1.3-2 电控转速限制装置工作特性图
1—停止喷油；2—恢复喷油

(2) 超速停油控制。当发动机转速超过了允许的最高转速时，为了防止发动机损坏，ECU 执行发动机超速停油控制。

过去的电控系统为了防止发动机超速，通常采用停止点火或延迟点火的方法。这些方法对排放和燃油经济性都是十分不利的。现代电控汽油机都采用电子限速装置切断燃油供给的控制方式，Bosch 公司 Motronic 系统中采用的电控转速限制装置的工作特性如图 1.3-3 所示。发动机运行时，ECU 将发动机的实际转速与 ROM 中允许的最高转速进行比较，当转速超过允许转速时，ECU 停止输出喷油脉冲信号。由于燃油供应停止，发动机转速下降，当转速下降到恢复供油转速时，ECU 恢复向发动机供油，如此反复循环，使发动机的转速始终保持在最高转速附近，防止发动机转速上升。

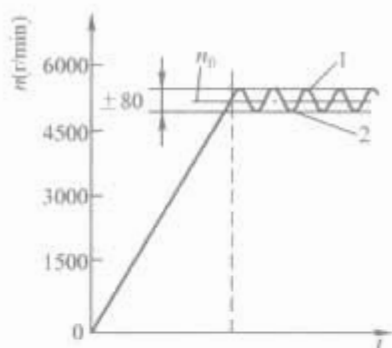


图 1.3-3 减速时停油与恢复供油转速特性
1—停油转速；2—恢复供油转速

1.4 供油系统的控制

1.4.1 供油系统的构成

不同类型的电控发动机的燃油供给系统组成可能有些差异，但其系统基本组成是相同的，即都是由电动燃油泵、燃油滤清器、燃油压力调节器、脉动阻尼器、油管及喷油器组成的。

1.4.2 供油系统的工作原理

供油系统即燃油供给系统的作用是，以确定的压力差向发动机进气总管或进气歧管内喷入清洁、雾化良好的燃油。发动机工作时，电动汽油泵从油箱吸入汽油，加压后送到输油管，汽油经输油管、滤清器到达燃油分配管，然后分送到各个喷油器。串联在油路上的压力调节器对汽油的压力进行调节，多余的汽油经压力调节器流向油箱。

1.4.3 供油系统各部分的作用

1.4.3.1 电动燃油泵

电动燃油泵是一种由小型直流电动机驱动的燃油泵，其作用是提供燃油喷射所需的压力。电动燃油泵的电动机和燃油泵连成一体，密封在同一壳体内。电动燃油泵按安装方式不同，可分为安装在油箱外输油管路中的外装式燃油泵和安装在油箱中的内装式燃油泵。前者一般采用滚柱泵，后者采用叶轮泵，但也可采用滚柱泵。

1.4.3.2 燃油滤清器

燃油滤清器的作用是将燃油中的颗粒状杂质分离出来，燃油燃烧产生的杂质会妨碍喷油器和燃油压力调节器的正常工作。因此，在电动燃油泵和中央喷射单元之间的输油管道上必须安装过滤器，且最好安装在车身下防护板旁的位置。

燃油滤清器的纸质滤芯的平均孔隙为 10 μ m，并包含一个带密封圈的纸筒。为了将滤芯的污染侧和清洁侧完全分开，在用耐冲击塑料制成的外壳内侧，熔入了密封圈纸筒，用一个塞头和滤清器上的支撑肋板沿轴向固定。

1.4.3.3 油轨

油轨的功能是将燃油均匀地、等压地输配给各个喷油器。

油轨还具有储油作用。油轨的容量比发动机工作循环的喷油量要大得多，这样可防止燃油压力的波动，并使与油轨相连的各喷油器承受相等的油压。此外，油轨的结构应使喷油器在其上面的安装方便。

1.4.3.4 压力调节器

喷油器的喷油量取决于喷油器的喷孔截面、喷油时间和喷油压差。在 EFI 系统中，ECU 通过控制喷油的喷油时间来实现对喷油量的控制。因此，要保证燃油喷射量的精确控制，在喷油器的结构尺寸一定时，必须保持恒定的喷油压差。喷油器将燃油喷入进气管内，喷油压差就是指输油管内

燃油压力与进气管内气体压力的差值。而进气管内的气体压力是随发动机转速和负荷的变化而变化的,要保持恒定的喷油压差,必须根据进气管内压力的变化来调节燃油压力。

压力调节器的功能是使油路中的燃油压力和进气管压力之差恒定不变,因此喷油器的喷油量仅取决于喷油器的开启时间。

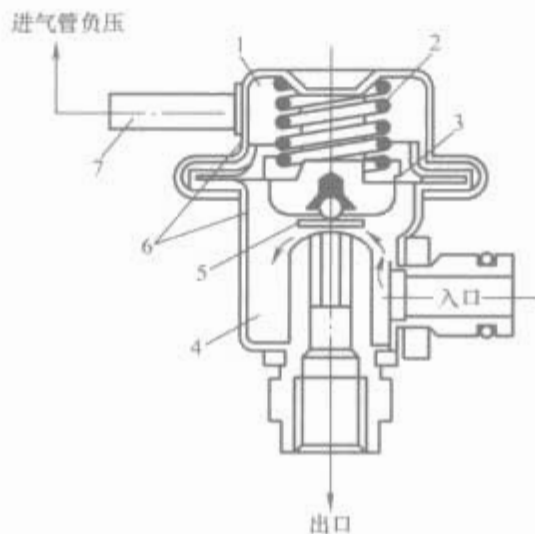


图 1.3-4 燃油压力调节器图
1—弹簧室; 2—弹簧; 3—膜片; 4—燃油室;
5—回油阀; 6—壳体; 7—真空管接头

压力调节器实际上是一种膜片控制的可溢流压力调节装置。根据系统需要,通过控制膜片将燃油压力控制在 $0.25 \sim 0.3 \text{ MPa}$, 压力调节器位于油轨的末端。图 1.3-4 中一个膜片把金属壳体的内腔分为两室,即弹簧室和燃油室,膜片上方的弹簧室通过软管与进气管相通,膜片与回油阀相连,回油阀控制回油量。

当油压超过预调的压力值时,膜片控制的阀门打开回油管路,多余的燃油在不受到压力的状况下流回燃油箱。在弹簧室内有一根通气管与发动机和节气门后的进气管相通。这样,燃油系统的压力就取决于进气管内的绝对压力。在节气门不同位置,通过喷油器的压降总是相同的。

1.4.3.5 喷油器

电控喷油器的功用是根据 ECU 的指令准确地把一定量的燃油喷入到进气门前方的进气道中。电控燃油喷射系统全部采用电磁式喷油器。单点式喷射系统的喷油器安装在节气门体空气入口处,多点喷射系统的喷油器安装在各缸进气管或气缸盖上的各缸进气道处。

喷油器由喷油器体和装有衔铁的针阀组成,喷油器体内有一个电磁线圈,它起引导针阀的作用。线圈中无电流时,针阀在螺旋弹簧的作用下固定在阀座上。而当线圈中通电时,便产生电磁作用力,针阀相对于阀座升起,升程约为 0.1 mm ,使燃油通过精确设计的轴针头部环形间隙喷出,在喷油器头部前端将燃油雾化。喷油脉冲持续时间为 $1 \sim 1.5 \text{ ms}$ 。为了减少燃油的冷凝损失和获得较好的燃油分配均匀性,应尽量避免燃油在进气道壁面上的冷凝与湿润。

1.5 进气系统的控制

1.5.1 进气系统的构成

进气系统的任务是向汽油机提供清洁的、与发动机负荷相适应的、经过计量的新鲜空气,使它们在进气管或气缸内与喷油器喷出的汽油形成品质良好的可燃混合气。

多点汽油喷射(电子控制发动机)的进气系统由空气滤清器、空气流量计、进气门及进气歧管等元件所组成,如图 1.3-5 所示。

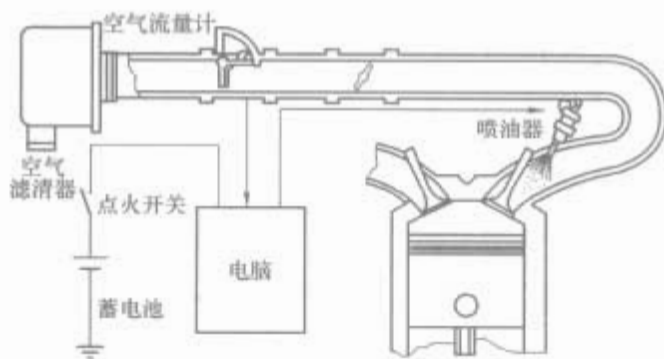


图 1.3-5 进气系统结构图

1.5.2 进气系统的工作原理

空气经过空气滤清器滤去气体中的尘埃等杂质后,流经空气流量传感器,经过计量后,空气流沿着节气门通道流入进气歧管,再分别供给各个汽缸。汽车行驶时,空气流量是由驾驶员加速踏板操纵节气门控制的,节气门装在节流阀上控制进入各缸的空气。当温度降低时,空气阀打开,空气经空气阀进入进气总管,附加的空气可提高怠速,以加快暖机过程。

1.5.3 进气系统各部分的作用

1.5.3.1 空气滤清器

电控燃油喷射发动机装用的空气滤清器一般都是干式纸质滤心式,其结构原理与普通发动机上的空气滤清器相同。

1.5.3.2 节气门体

节气门体安装在进气管中,用以控制发动机正常运行工况下的进气量。节气门体主要由节气门和怠速空气道等组成。由于电控燃油喷射发动机怠速运转时,一般将节气门完全关闭,所以专门设有怠速空气道,以供给发动机怠速时所需的空气。怠速空气道由 ECU 通过怠速控制阀控制。

1.5.3.3 进气管

在多点电控燃油喷射式发动机上,为了消除进气波动和保证各缸进气均匀,对进气总管和进气歧管的形状、容积都有严格的要求,每个气缸必须有一个单独的进气歧管。有些发动机的进气总管与进气歧管制成一体,有些则是分开制造再用螺栓连接。

在采用单点燃油喷射系统的发动机上,由于喷油器安装在节气门体上,进气管与化油器式发动机进气管的要求和结构基本相同。

1.5.3.4 空气流量计

空气流量计是一种测量发动机吸入空气量的流量计。根据测量原理的不同,空气流量计可分为叶片式、卡门涡旋式和热线式等。

1.6 点火系统的控制

1.6.1 点火系统的基本组成与工作原理

1.6.1.1 基本组成

电控点火系统一般由电源、传感器、ECU、点火器、点火线圈、分电器(有分电器电控点火系统)、火花塞等组成,如图 1.3-6 所示。

(1) 电源。电源一般由蓄电池和发电机组成,主要是给点火系统提供所需的电能。

(2) 传感器。传感器主要用于检测发动机各种运行参数的变化,为 ECU 提供点火控制所需的信号。传感器主要有凸轮轴位置传感器、曲轴位置传感器、爆燃传感器、进气管绝对压力传感器(或空气温度计)、节气门位置传感器和冷却液温度传感器等。

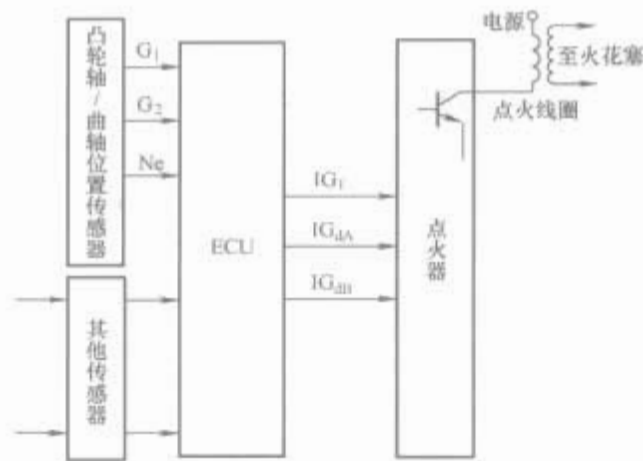


图 1.3-6 电控点火系统的基本组成

(3) ECU。ECU 是电控点火系统的中枢。在发动机工作时，它不断地接收各传感器的信息，按程序计算出最佳点火提前角，并向点火器发出指令。

(4) 点火器。点火器是电控点火系统的执行元件，它可将电子控制系统输出的点火信号进行功率放大后，驱动点火线圈工作。

(5) 点火线圈。点火线圈可将火花塞跳火所需的能量存储在线圈的磁场中，并将电源提供的低压电转变为足以产生击穿火花塞间隙 15~20kV 的高压电。在有分电器的电控点火系统中，只有一个点火线圈，而无分电器的点火器系统中则有多个点火线圈。

(6) 分电器。在有分电器的电控点火系统中，分电器根据发动机的点火顺序，将点火线圈产生的高压电依次输送给各缸火花塞。

(7) 火花塞。火花塞主要是利用点火线圈产生的高压电产生电火花，点燃气缸内的混合气。

1.6.1.2 工作原理

发动机工作时，ECU 根据接收到的各传感器信号，按有关程序和相关数据，确定出该工况下最佳点火提前角和点火线圈初级电路闭合角（通电时间），并以此向点火器发出指令。点火器则根据电子控制单元的指令，控制点火线圈初级电路的导通和截止。当初级电路导通时，有电流从点火线圈中的初级电路通过，点火线圈的点火能量以磁场的形式储存起来。当初级电路中的电流被切断时，在次级线圈中将产生很高的感应电动势（15~20kV），经分电器或直接送至工作气缸内的火花塞。点火能量击穿火花塞间隙，产生的电火花点燃气缸内的混合气，使发动机完成做功过程。

此外，在具有爆燃控制功能的电控点火系统中，ECU 还根据爆燃传感器的输入信号来判断发动机有无爆燃及爆燃的强度，并对点火提前角进行闭环控制。

1.6.2 电控点火系统的分类

1.6.2.1 汽油机点火系统的分类

汽油机点火系统主要有传统点火系统和计算机控制的点火系统两大类型，传统点火系统又可分为磁电机点火系统和蓄电池点火系统。

(1) 磁电机点火系统。磁电机点火系统的电能是由磁电机本身提供的，其点火线圈、断电器、配电器组成一个整体，结构较复杂，且低速时的点火性能较差，一般只用于无蓄电池的机动车上，如小排量摩托车等。

(2) 蓄电池点火系统。蓄电池点火系统又称有触点式点火系统，由于其结构简单、工作可靠，半个多世纪以来曾在汽车上得到了广泛的应用。但随着人们对汽油发动机技术指标要求的不断提高，如在提高动力性和安全性、降低油耗和减少排放污染等方面，它已不能满足高速发动机的点火要

求，所以逐渐被计算机控制的点火系统取代。蓄电池点火系统的主要缺点是：

1) 高速易断火，不适合高速发动机。由于蓄电池点火系统中，点火线圈产生的次级电压随着发动机的转速升高而下降，所以容易导致发动机高速断火。

2) 断电器触点易烧蚀，工作可靠性差。当断电器触点断开时，初级绕组将产生 300V 左右的感应电动势，触点间易产生火花，烧蚀触点。

3) 点火能量低，点火可靠性差。在蓄电池点火系统中，为了减少触点烧蚀故障的发生，不得不限制点火线圈初级电路的电流，从而使点火能量的提高受到限制。

(3) 微机控制的点火系统。微机控制的点火系统即电控点火系统，于 1976 年由美国克莱斯勒汽车公司首先研制成功，系统中使用模拟计算机根据各传感器信号对点火提前角进行控制。1977 年美国通用汽车公司开始使用数字式电控点火系统。近年来，由于微电子技术的迅速发展，随着电控点火系的不断完善，电控点火系已在各国汽车上得到广泛应用。电控点火系的主要优点是：

1) 在各种工况及环境条件下，均可自动获得最佳的点火提前角，从而使发动机的动力性、经济性、排放性及工作稳定性等方面均为最佳。

2) 在整个工作过程中，均可对点火线圈初级电路的通电时间和电流进行控制，从而使点火线圈中存储的点火能量保持恒定，不仅提高了点火的可靠性，而且可有效地减少电能消耗，防止点火线圈烧损。

3) 采用爆燃控制功能后，可使点火提前角控制在爆燃的临界状态，以此获得最佳的燃烧过程，有利于发动机各种性能的提高，如图 1.3-7 所示。

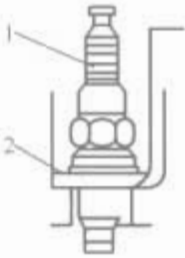


图 1.3-7 火花塞座金属垫型爆燃传感器
1—火花塞；2—爆燃传感器

1.6.2.2 电控点火系统的分类

电控点火系统可分为两大类：有分电器式和无分电器式。两者的主要组成和控制原理基本相同。

有分电器的电控点火系统因为机械装置本身的局限性，无法保证在各种状况下点火提前角均为最佳值。此外，由于分电器中的运动部件的磨损，又会导致驱动部件松动，影响点火提前角的稳定性和均匀性。

无分电器的电控点火系统是一种全电子化的点火系统。它的突出优点是：由于无机传动，减少了分火头与旁电极这一中间跳火间隙的能量损耗及由此产生的射频干扰，无机构磨损，不需调整，工作可靠。此外，由于无分电器，发动机各部件的布置更容易、更合理。

1.6.3 点火系统的控制电路

各车型的点火控制电路基本相同，日本丰田皇冠 3.0 轿车点火控制电路如图 1.3-8 所示。点火开关接通后，蓄电池经 30A 熔丝和点火开关向点火器的“+B”端子和点火线圈的“+”端子供电，点火线圈的“-”端子和点火器的“-”端子经点火器内的功率晶体管搭铁，从而形成回路。ECU 根据各种传感器的信号，通过 IGT 端子控制点火器内功率晶体管的导通与截止。点火后，点火器通过 IGF 端子向 ECU 反馈点火确认信号。

1.7 怠速控制系统

1.7.1 怠速控制系统的组成

所谓怠速控制就是怠速转速控制。配置怠速控制系统

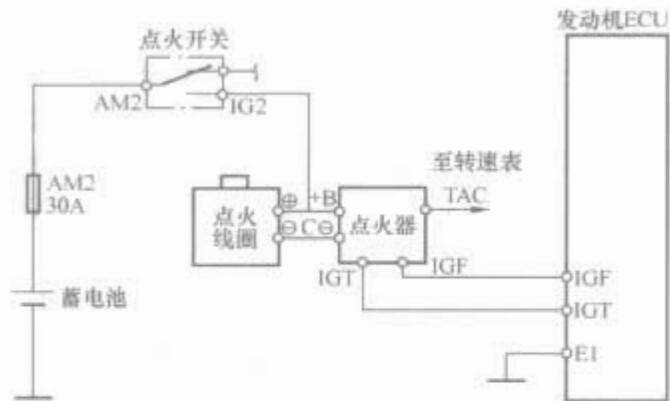


图 1.3-8 点火控制电路

后，发动机的怠速转速在汽车试用期内，不会因发动机、汽缸积炭、火花塞间隙和温度等变化而发生改变。怠速控制系统由各种传感器、信号控制开关、电子控制器、怠速控制阀和节气门旁通空气道等组成，如图 1.3-9 所示。

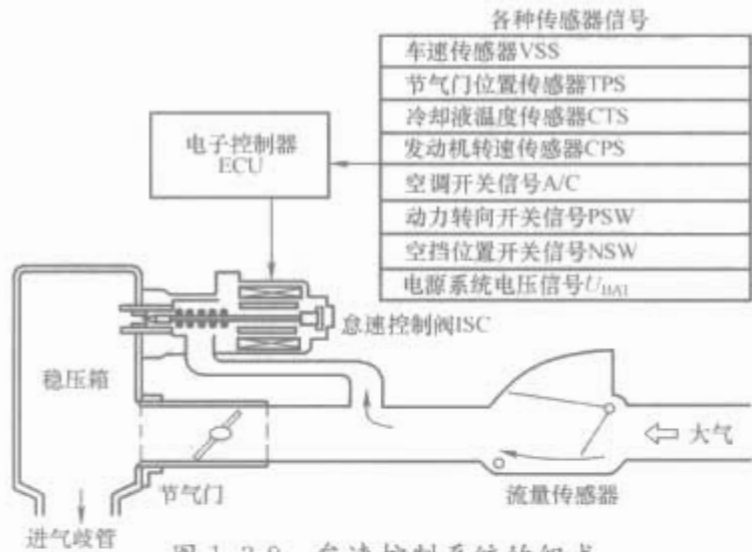


图 1.3-9 怠速控制系统的组成

车速传感器提供车速信号，节气门位置传感器提供怠速触点开闭信号，这两个信号用来判定发动机是否处于怠速状态。发动机怠速时，节气门关闭，节气门位置传感器的怠速触点 IDL 闭合，传感器输出端子 IDL 输出低电平信号。因此，当 IDL 端子输出低电平信号时，如果车速为零，就说明发动机处于怠速状态；如车速不为零，则说明发动机处于减速状态。

冷却液温度信号用于修正怠速转速。在 ECU 内部，存储有不同水温对应的最佳怠速转速。在冷车起动后的暖机过程中，ECU 根据发动机温度信号，通过控制怠速控制阀的开度来控制相应的怠速转速，并随发动机温度升高逐渐降低怠速转速。当冷却液温度达到正常工作温度时，怠速转速恢复正常怠速转速。

空调开关、动力转向开关、空挡起动开关信号和电源电压信号等向 ECU 提供发动机负荷变化的状态信息。在 ECU 内部，存储有不同负荷状况下对应的最佳怠速转速。

1.7.2 怠速控制系统电路

采用步进电动机式怠速控制阀的怠速控制线路如图 1.3-10 所示。当发动机怠速负荷变化时，在怠速转速变化

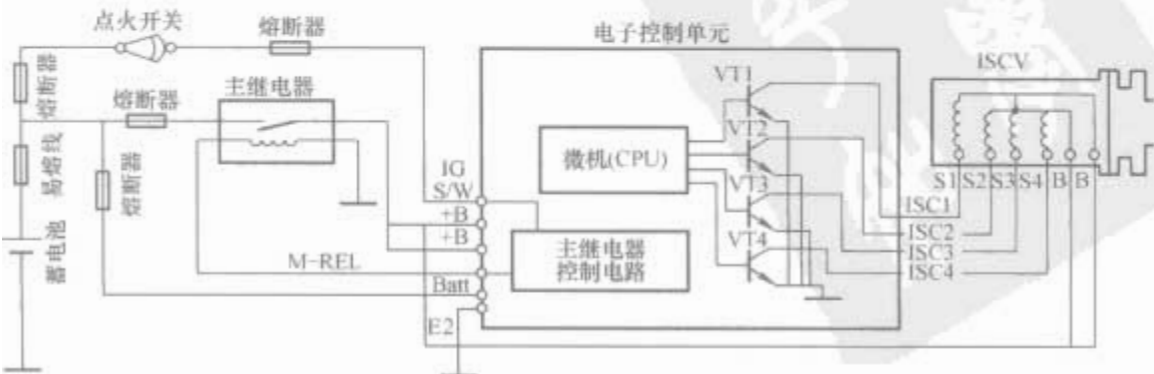


图 1.3-10 步进电动机式怠速控制阀控制电路

之前，ECU 将按照一定顺序，控制驱动电路中的三极管 VT1、VT2、VT3、VT4 适时导通，分别接通步进电动机定子绕组电流，使电动机转子旋转，带动控制阀的阀芯移动，从而调节进气量，使发动机怠速转速达到目标转速。

1.7.2.1 初始位置的确定

为了改善发动机的再次起动性能，在点火开关断开时，ECU 将控制怠速控制阀处于全开状态，为再次起动做好准备。

当 ECU 内部主继电器控制电路接收到点火开关拨到 OFF (断开) 位置的信号时，ECU 将利用备用电源输入端 (Batt 端子) 提供的电压控制主继电器 (燃油喷射继电器) 线圈继续供电 2s，使步进电动机的控制阀退回到初始位置，以便下次起动时具有较大的进气量。

1.7.2.2 起动控制

起动发动机时，由于怠速控制阀预先设定在全开位置，因此进气量较大，发动机容易起动。一旦发动机被起动，如果阀门保持在全开位置，怠速转速就会升得过高。所以在起动时或起动后，当发动机转速达到规定值 (该值由冷却液温度确定) 时，ECU 就会控制步进电动机步进的步数，使控制阀阀门关小到内冷却液温度确定的阀芯位置。使怠速转速稳定。如发动机冷却液温度在起动时为 20℃，当发动机转速达到 500r/min 时，ECU 将控制步进电动机从全开位置 A 点 (125 步) 步进到达 B 点 (70 步) 位置，如图 1.3-11 所示，使阀门关小，防止转速过高。

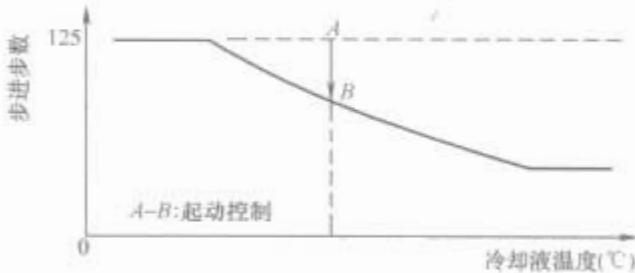


图 1.3-11 步进电动机怠速控制阀的起动特性

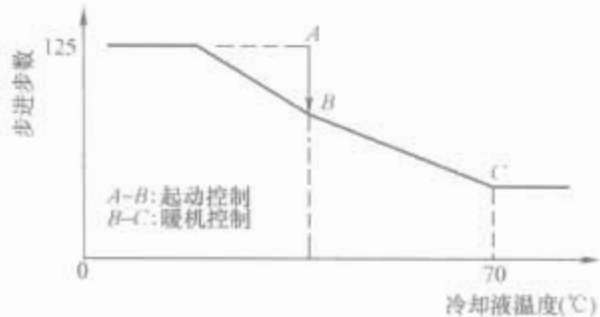


图 1.3-12 步进电动机怠速控制阀的暖机控制特性

1.7.2.3 暖机控制

在发动机起动后的暖机过程中，ECU 将根据冷却液温度传感器信号确定步进电动机步进的位置。随着转速升高和发动机温度升高，控制阀阀门将逐渐关小，步进电动机步进的步数逐渐减少，如图 1.3-12 所示。当冷却液温度达到 70℃ 时，暖机控制结束，步进电动机及其阀芯位置保持不变。

1.8 排放净化控制系统

汽车排放污染对人类环境的危害已成为一种严重的社会公害。汽车的排放污染主要来源于发动机排出的废气 (约占 65% 以上)、曲轴箱窜气 (约占 20%) 和燃料供给系统中蒸发的燃油蒸气 (占 10%~20%)。汽油

机的主要排放污染物是一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)和氮氧化物(NO_x)，柴油机的主要排放污染物是HC、NO_x和碳烟。

针对汽车污染源和各种污染物的产生机理，近年来，在现代汽车尤其是轿车上装用了多种排放控制系统，主要包括曲轴箱强制通风(PCV)系统、汽油蒸气排放(EVAP)控制系统、废气再循环(EGR)系统、三元催化转换器(TWC)系统、二次空气供给系统和热空气供给系统等。随着电控技术的发展，在高级轿车上部分排放控制系统(如汽油蒸气排放系统、废气再循环系统、三元催化转换器系统、二次空气供给系统)也采用了ECU控制。

1.8.1 汽油蒸气排放控制系统

1.8.1.1 汽油蒸气排放控制系统的功能

汽油蒸气排放控制系统的功能是收集汽油箱和浮子室(化油器式汽油机)内蒸发的汽油蒸气，并将汽油蒸气导入气缸参加燃烧，从而防止汽油蒸气直接排入大气而造成污染。同时，还必须根据发动机工况，控制导入气缸参加燃烧的汽油蒸气量。

1.8.1.2 汽油蒸气排放控制系统的组成与工作原理

汽油蒸气排放控制系统是为防止汽油箱内的汽油蒸气排入大气产生污染而设的。在装有汽油蒸气排放控制系统的汽车上，汽油箱盖上只有空气阀，而不设蒸汽放出阀。汽油蒸气排气控制系统如图1.3-13所示。活性炭罐与油箱之间设有排气管和单向阀，汽油箱内的汽油蒸气超过一定压力时，顶开单向阀经排气管进入活性炭罐，活性炭罐内的活性炭将燃油蒸气吸附在炭罐内。发动机工作时，活性炭罐内的汽油蒸气经定量排放孔、吸气管被吸入进气管。活性炭罐的上端设有一个真空控制阀，真空控制阀为一膜片阀，膜片上方为真空室，控制阀用来控制定量排放孔的开闭。真空控制阀与进气管之间的真空管路中设有受ECU控制的电磁阀，用以调节真空控制阀上方真空室的真空度，改变真空控制阀的开度，从而控制吸入进气管的汽油蒸气量。为防止活性炭罐内的燃油蒸气被吸入进气管后使混合气变浓，活性炭罐下方设有进气滤芯并与大气相通，使部分清洁空气与活性炭罐内的燃油蒸气一起被吸入进气管。

有些发动机(如韩国大宇轿车中的发动机等)上的汽油蒸气排放系统不采用ECU控制，即真空控制阀与进气管之间的真空管路中不安装受ECU控制的电磁阀，真空控制阀的开度直接由真空度控制，真空管口设在靠近节气门全闭位置的上方。发动机转速一定时，随发动机负荷(节气门开度)的增大，真空管口处的真空度增加，真空控制阀的开度增大；发动机负荷减小，真空控制阀开度也减小。

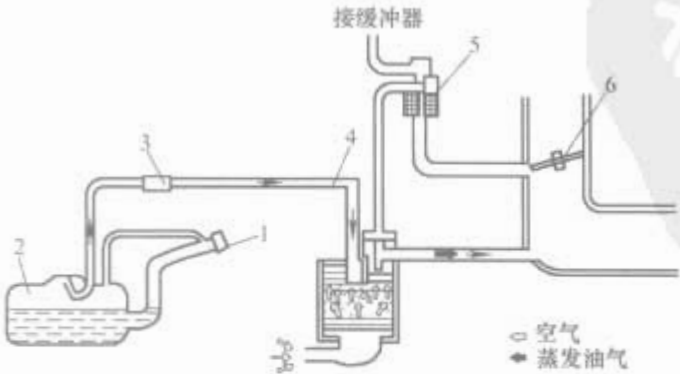


图 1.3-13 EVAP 控制系统

1—油箱盖；2—油箱；3—单向阀；4—排气管；
5—电磁阀；6—节气门

在部分电子控制汽油蒸气排放系统中，活性炭罐上不设真空控制阀，而是将受ECU控制的电磁阀直接装在活性炭

罐与进气管之间的吸气管中。图1.3-14所示为韩国现代轿车装用的电子控制汽油蒸气排放系统，电脑根据节气门位置传感器、水温传感器和进气温度传感器信号控制电磁阀通电或断电，电磁阀控制活性炭罐与进气管之间的吸气通道。发动机怠速(进气量较少)时，电脑使电磁阀断电，关闭吸气通道，活性炭罐内的燃油蒸气不能被吸入进气管。

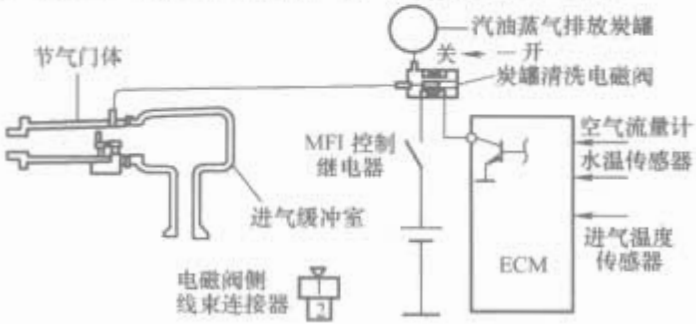


图 1.3-14 韩国现代轿车汽油蒸气排放系统

1.8.2 废气再循环控制系统

废气再循环控制系统的功能

NO_x是空气中的氮气与氧气在高温、高压条件下形成的。发动机排出的NO_x量主要与气缸内的最高温度有关，气缸内最高温度越高，排出的NO_x量越多。

废气再循环控制系统的功能是将适量的废气重新引入气缸参加燃烧，从而降低气缸内的最高温度，以减少NO_x的排放量。此外，为保证发动机正常工作和性能不受过多影响，必须根据发动机工况的变化，控制废气再循环量。

采用ECU控制的废气再循环系统主要有两种类型：开环控制废气再循环系统和闭环控制废气再循环系统。

1.8.2.1 开环控制废气再循环系统

开环控制废气再循环系统如图1.3-15所示，主要由EGR阀和EGR电磁阀等组成。EGR阀安装在废气再循环通道中，用以控制废气再循环量。EGR电磁阀安装在EGR阀的真空通道中，ECU根据发动机冷却液温度、节气门开度、转速和起动等信号来控制电磁阀的通电或断电。ECU不给EGR电磁阀通电时，控制EGR阀的真空通道接通，EGR阀开启，进行废气再循环；ECU给EGR电磁阀通电时，控制EGR阀的真空通道被切断，EGR阀关闭，停止废气再循环。

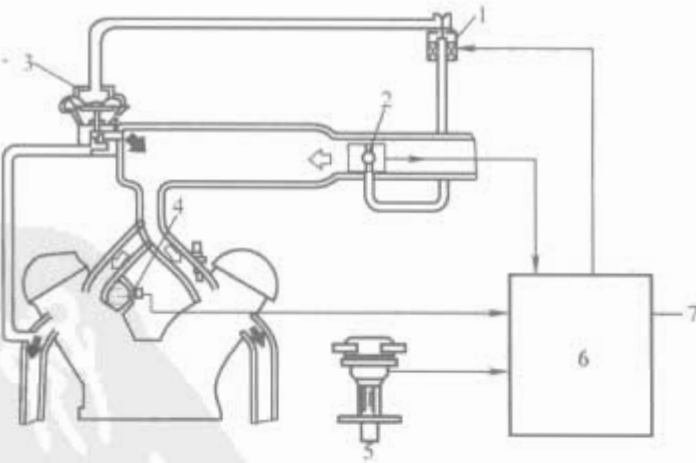


图 1.3-15 开环控制废气再循环系统

1—EGR电磁阀；2—节气门；3—EGR阀；4—水温传感器；
5—曲轴位置传感器；6—ECU；7—起动信号

发动机工作时，ECU给EGR电磁阀通电停止废气再循环的工况有起动工况(起动开关信号)、怠速工况(节气门位置传感器怠速触点闭合信号)、暖机工况(冷却液温度信号)、转速低于900r/min或高于3200r/min(转速信号)。在除上述以外的其他工况，ECU均不给电磁阀通电，都进行废气再循环。废气再循环量取决于EGR阀的开度，而EGR

阀的开度直接由真空度控制。由于真空管口设在靠近节气门全闭位置的上方，随发动机转速和负荷（节气门开度）的增大，真空管口处的真空度增加，EGR 阀的开度增大；随发动机转速和负荷的减小，EGR 阀的开度也减小。发动机工作进行废气再循环时，废气再循环量的多少可用废气再循环率（EGR 率）来表示，EGR 率是指废气再循环量在进入气缸内的气体中所占的比率，即

$$\text{EGR 率} = [\text{EGR 量} / (\text{进气量} + \text{EGR 量})] \times 100\%$$

有些发动机的 EGR 控制系统中，EGR 电磁阀采用占空比控制型电磁阀，ECU 通过占空比控制电磁阀的开度，调节作用在 EGR 阀上的真空度，控制 EGR 阀的开度，以实现废气再循环量的控制。在此系统中，通向 EGR 阀的真空管口一般设在节气门之后。

在不采用 ECU 控制的 EGR 系统中，通向 EGR 阀的真空管路一般有两个控制阀共同控制。一个是双金属开关阀，根据冷却液温度控制真空通道的通断；另一个是膜片式真空控制阀，根据负荷变化（进气管真空度和排气压力变化）控制真空通道的通断。当冷却液温度和负荷达到一定值进行废气再循环时，与采用普通电磁阀控制的 EGR 系统一样，EGR 阀的开度直接由真空度控制，即废气再循环量取决于真空管口处的真空度。

在开环控制 EGR 系统中，ECU 根据各传感器信号确定发动机工况，并按其内存的 EGR 率与转速、负荷的对应关系进行控制，而对其控制的结果不能进行检测。

1.8.2.2 闭环控制 EGR 系统

在闭环控制 EGR 系统中，检测实际的 EGR 率或 EGR 阀开度作为反馈控制信号，其控制精度更高。

用 EGR 阀开度作为反馈信号的闭环控制 EGR 系统如图 1.3-16 所示。与采用占空比控制型电磁阀的开环控制 EGR 系统相比，只是在 EGR 阀上增设了一个 EGR 阀开度传感器。闭环控制 EGR 系统工作时，ECU 可根据 EGR 阀开度传感器的反馈信号修正电磁阀的开度，使 EGR 率保持在最佳值。

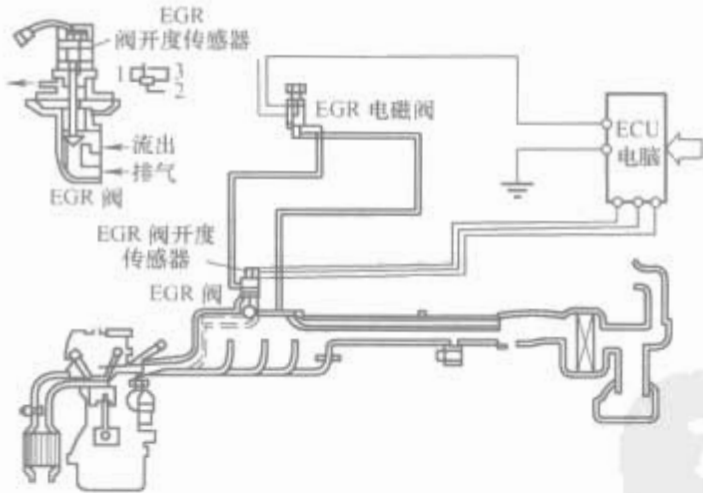


图 1.3-16 用 EGR 阀开度反馈控制的 EGR 系统

EGR 阀开度传感器为电位计式，其工作原理与电位计式节气门位置传感器类似。EGR 阀开度传感器与 ECU 之间有三条连接线，分别为电源线、搭铁线和信号线。ECU 通过电源线给传感器提供 5V 的标准电压，传感器将 EGR 阀开启高度变化转换为电信号经信号线输送给 ECU。

用 EGR 率作为反馈信号的闭环控制 EGR 系统中，ECU 根据 EGR 率传感器信号对 EGR 电磁阀实行反馈控制，其控制原理如图 1.3-17 所示。EGR 率传感器安装在进气总管中的稳压箱上，新鲜空气经节气门进入稳压箱，参与再循环的废气经 EGR 电磁阀进入稳压箱，传感器检测稳压箱内

气体中的氧浓度（氧浓度随 EGR 率的增加而降低），并转换成电信号输送给 ECU，ECU 根据此反馈信号修正 EGR 电磁阀的开度，使 EGR 率保持在最佳值。



图 1.3-17 用 EGR 率反馈控制的 EGR 系统

1.8.3 三元催化转换器（TWC）与空燃比反馈控制系统

1.8.3.1 TWC 的功能

TWC 是现代汽车普遍采用的排气净化装置，三元催化转换器（TWC）安装在排气管中部，其功能是利用转换器中的三元催化剂，将发动机排放出废气中的有害气体转变为无害气体。

1.8.3.2 TWC 的构造

TWC 一般为整体不可拆卸式。日本丰田凌志 LS400 轿车 TWC 如图 1.3-18 所示，该车型装 V 形发动机，左右排气管上各装一个 TWC。TWC 内装的三元催化剂一般为铂（或钯）与铑贵金属的混合物。

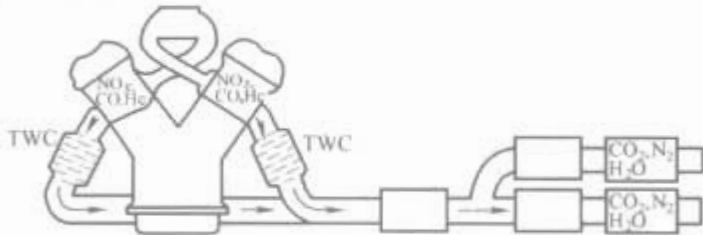


图 1.3-18 LS400 轿车的 TWC

根据催化剂载体的结构特点，TWC 可分为颗粒型和蜂巢型两种类型。前者将催化剂沉积在颗粒状氧化铝载体表面，后者将催化剂沉积在蜂巢状氧化铝载体表面，氧化铝表面有形状复杂的表层，可增大催化剂与废气的实际接触面积。

1.8.3.3 影响 TWC 转换效率的因素

发动机排出的废气流经 TWC 时，三元催化剂不仅可使废气中的碳氢化合物和 CO 有害气体进一步氧化，生成无害气体 CO₂ 和 H₂O，并能促使废气中的 NO_x 与 CO 反应生成无害的 CO₂ 和 N₂ 气体。TWC 将有害气体转变为无害气体的效率受诸多因素影响，其中影响最大的是混合气的浓度和排气温度。

TWC 的转换效率与混合气浓度的关系如图 1.3-19 所示，只有在标准的理论空燃比 14.7 附近，对废气中三种有害气体（碳氢化合物、CO、NO_x）的转换效率才均比较高。在发动机工作中，为将实际空燃比精确控制在标准的理论空燃比附近，在装用三元催化转换装置的汽车上，一般都装有氧传感器检测废气中的氧浓度，氧传感器信号输送给 ECU 后，用来对空燃比进行反馈控制，即电控燃油喷射系统的闭环控制。

电控燃油喷射系统的闭环控制原理如图 1.3-20 所示。在电控燃油喷射开环控制系统中，ECU 只是根据转速信号、进气量信号、冷却液温度信号等确定喷油量，以控制空燃比，但并不对实际控制的空燃比是否精确进行检测。在闭环

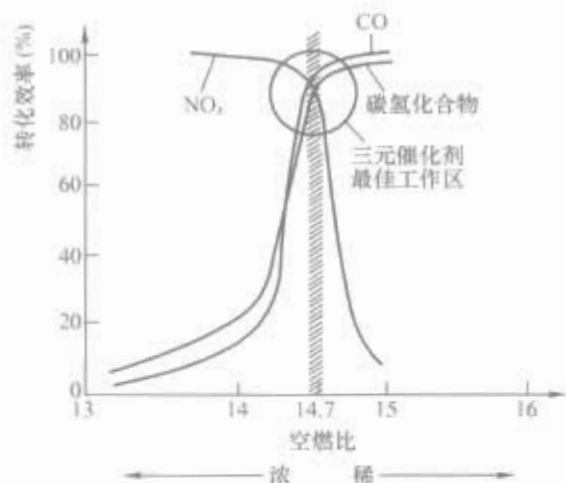


图 1.3-19 TWC 的转换效率与混合气浓度的关系

控制系统中，氧传感器安装在 TWC 与发动机之间的排气管或排气歧管上，将检测到的废气中氧浓度信号输送给 ECU，ECU 根据此信号对喷油器的喷油量校正进行修正，使实际的空燃比更接近理论空燃比。

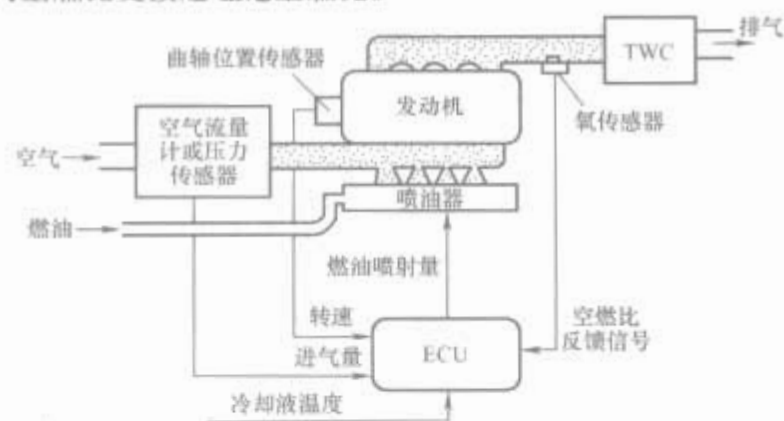


图 1.3-20 EFI 系统的闭环控制原理

在装有氧传感器的电控燃油喷射发动机上，电控燃油喷射（EFD）系统并不是在所有工况下都进行闭环控制，在发动机起动、怠速、暖机、加速、全负荷、减速断油等工况下，发动机不可能以理论空燃比工作，仍采用开环控制方式。此外，氧传感器温度在 400℃ 以下、氧传感器或其电路发生故障时，也只能采用开环控制。电控燃油喷射系统进行开环控制还是进行闭环控制，由 ECU 根据相关输入信号确定。

此外，发动机的排气温度过高（815℃ 以上）时，TWC 的转换效率将明显下降。有些三元催化转换装置中装有排气温度报警装置，当报警装置发出报警信号时，应熄火，查明排气温度过高的原因，予以排除。在使用中，排气温度过高一般是因发动机长时间在大负荷下工作或因故障而燃烧不完全所致。

1.8.3.4 氧传感器

氧传感器可分为氧化锆式和氧化钛式两种类型。

(1) 氧化锆氧传感器。氧化锆传感器的构造及其输出特性如图 1.3-21 所示。该传感器的基本元件是氧化锆管，氧化锆管固定在带安装螺纹的固定套内。在氧化锆管的内、外表面均覆盖着一薄层铂作为电极，传感器内侧通大气，外侧直接与排气管中的废气接触。在氧化锆管外表面的铂层上，还覆盖着多孔的陶瓷涂层，并加有带槽口的防护套管，用来防止废气对铂电极产生腐蚀。在传感器的线束连接器端有金属护套，其上设有小孔，以便使氧化锆管内侧通大气。

氧化锆氧传感器实质是一个化学电池，又称氧浓度差电池。在 400℃ 以上的高温时，若氧化锆管内、外表面接触的气体中氧的浓度有很大差别，则在氧化锆管内、外表面的两个铂电极之间将会产生电动势。发动机工作时，由于氧化锆管内表面接触的大气中氧浓度是固定的，而与外表面接触的

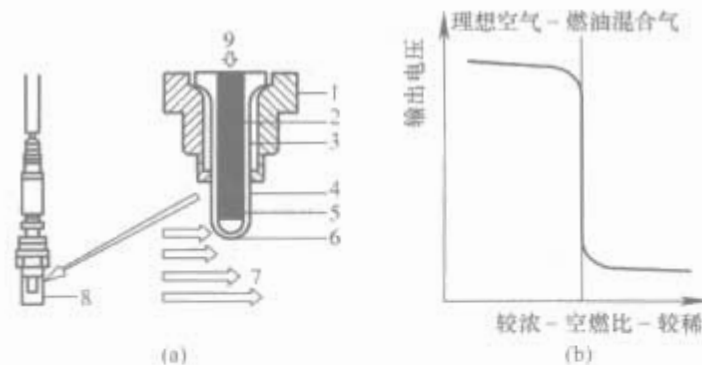


图 1.3-21 氧化锆氧传感器及其输出特性

(a) 结构；(b) 输出特性

1—法兰；2—铂电极；3—氧化锆管；4—铂电极；5—加热器；6—涂层；7—废气；8—套管；9—大气

废气中氧浓度是随空燃比变化的，所以将氧化锆管内、外表面两个电极间产生的电动势输送给 ECU，即可作为判断实际空燃比的依据。当混合气过稀时，排出的废气中氧含量高，传感器内、外侧氧浓度差小，两电极间产生的电压很低（接近 0V）；反之，混合气过浓时，排出的废气中氧含量低，传感器内、外侧氧浓度差大，两电极间产生的电压高（接近 1V）。在理论空燃比附近，氧传感器输出的电压信号有一突变。

由于氧化锆只能在 400℃ 以上的高温时才能正常工作，因此为保证发动机在进气量少、排气温度低时也能正常工作，有的氧传感器内装有加热器，加热器也由发动机 ECU 控制。不带加热器的氧传感器称为普通型氧传感器，带加热器的氧传感器称为热型氧传感器。

(2) 氧化钛氧传感器。氧化钛氧传感器是利用化学反应强、对氧气敏感、易于还原的半导体材料氧化钛与氧气接触时发生氧化还原反应，使晶格结构发生变化，从而导致电阻值变化这一原理工作的。它是一种电阻型气敏传感器。

氧化钛传感器的结构如图 1.3-22 所示，主要由二氧化钛元件、导线、金属外壳和接线端子等组成。当废气中的氧浓度高时，二氧化钛的电阻值增大；反之，废气中的氧浓度较低时，二氧化钛的电阻值减小，利用适当的电路对电阻变量进行处理，即可转换成电压信号输送给 ECU，用来确定实际的空燃比。

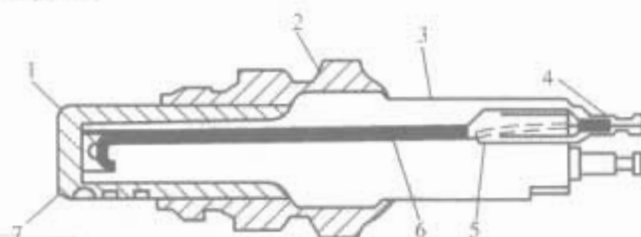


图 1.3-22 氧化钛传感器

1—二氧化钛元件；2—金属外壳；3—陶瓷绝缘体；4—接线端子；5—陶瓷元件；6—导线；7—金属保护管

(3) 氧传感器控制电路。图 1.3-23 所示为日本丰田凌志 LS400 轿车氧传感器控制电路，该车装有两个热型主氧传感器和两个普通型副氧传感器，发动机 ECU 控制主氧传感器加热线圈的搭铁回路。4 个氧传感器信号分别由各自的端子向 ECU 提供反馈信号，以便对空燃比进行闭环控制。

在闭环控制过程中，当实际的空燃比小于理论空燃比（混合气浓）时，氧传感器向 ECU 输入高电压信号（0.75~0.90V），此时 ECU 将减少喷油量，使实际空燃比增大；当空燃比增大到理论空燃比时，氧传感器输出信号电压突变下降至 0.1V 左右，此时 ECU 将增加喷油量，使实际空燃比

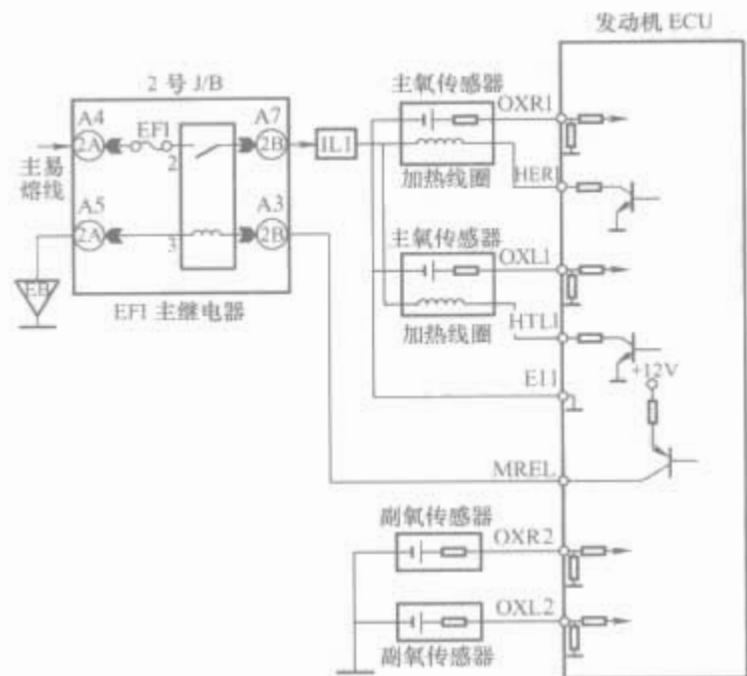


图 1.3-23 氧传感器控制电路

减小。如此反复，ECU 根据氧传感器信号不断调节喷油量，将实际空燃比控制在理论空燃比附近，保证三元催化转换装置以较高的转换效率工作。

1.9 巡航控制

1.9.1 巡航控制系统的组成

巡航控制系统（CCS）主要由操纵开关、安全开关、传感器、巡航控制 ECU 和执行元件等组成，如图 1.3-24 所示。汽车处于巡航控制模式行驶时，ECU 根据各传感器的信号确定维持或解除巡航控制模式，如维持巡航控制模式，则根据相关传感器信号和设定的巡航控制车速，确定节气门的开度，并通过执行元件调节节气门开度，使汽车自动以设定的巡航控制车速行驶。

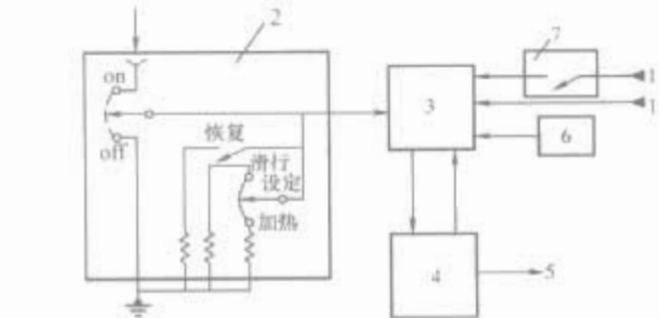


图 1.3-24 巡航控制系统的组成
1—电源；2—操纵开关；3—巡航控制 ECU；4—执行元件；
5—接节气门；6—车速传感器；7—制动灯开关

1.9.1.1 操纵开关

操纵开关安装在转向信号手柄上或转向盘上，驾驶员通过操纵开关给 ECU 输入巡航控制命令，主要用于选择巡航控制模式、设置或修改巡航控制车速等。

1.9.1.2 安全开关

安全开关的功用是向 ECU 提供解除巡航控制的信号，以免巡航控制系统的工作与驾驶员的操作目的发生冲突，导致系统损坏或发生事故。安全开关包括制动灯开关、驻车制动开关、离合器开关和空挡起动开关。

1.9.1.3 传感器

巡航控制系统工作时，除上述开关给 ECU 的输送信号外，还必须由车速传感器、节气门传感器、执行元件位置传感器向 ECU 提供信号。车速传感器和节气门位置传感器与发动机控制系统和自动变速器控制系统共用。执行元件位置传感器向 ECU 提供元件的位置反馈信号，目前采用较

多的是电位计式，其结构和工作原理与节气门位置传感器基本相同。

1.9.1.4 巡航控制 ECU

有些汽车的巡航控制 ECU 是专用的，有些则与发动机控制 ECU 或车身控制系统 ECU 等合为一体。巡航控制 ECU 主要由稳压电源电路、D/A 转换电路、存储电路、低速限制电路、高速限制电路、保护电路、加速控制电路、减速控制电路等组成。ECU 接收来自车速传感器、节气门位置传感器、执行元件位置传感器和各种开关的信号，按照存储的程序进行处理，当汽车在巡航控制车速范围内行驶时，ECU 接收到驾驶员通过操纵开关输入的“SET”设置信号后，存储此时的行驶车速信号并进入巡航控制模式，然后 ECU 便对车速传感器信号与设定的巡航车速进行比较，根据比较结果向执行元件发出指令信号，控制执行元件的动作，以调整节气门开度，使实际车速与设定车速相一致。

早期的巡航控制 ECU 一般都是采用模拟电子技术制造的，主要由 4 个不同功能的运算放大器组成，其工作原理如图 1.3-25 所示。驾驶员通过设定开关 S1 设定巡航控制车速，S1 向采样及保持电路发出信号，让其对已经选定的指令车速采样并记忆下来。切断开关 S2 安装在控制执行元件的指令信号输出电路中。汽车在巡航控制模式行驶时，当车速下降到低于 40km/h、踩下制动踏板、拉起驻车制动操纵手柄、自动变速器挂入 P 或 N 位时，或驾驶员通过操纵开关输入“Cancel”取消信号时，开关 S2 切断 ECU 向执行元件输送控制信号的电路，自动解除巡航控制模式。运算放大器 N1 是一个比较器，它对驾驶员设定的巡航控制车速与实际车速进行比较，并将得到的误差信号 V_e 送给运算放大器 N2 和 N3。运算放大器 N2 为线性运算放大器，运算放大器 N3 为积分运算放大器，可变电阻 R_1 和 R_3 用来调运算放大器 N2 和 N3 的放大倍数。运算放大器 N4 产生一模拟电压输出信号 V_s ，这个模拟电压信号通过电压/脉冲信号转换器被转换成脉冲信号 V_c ，然后驱动节气门执行元件工作。

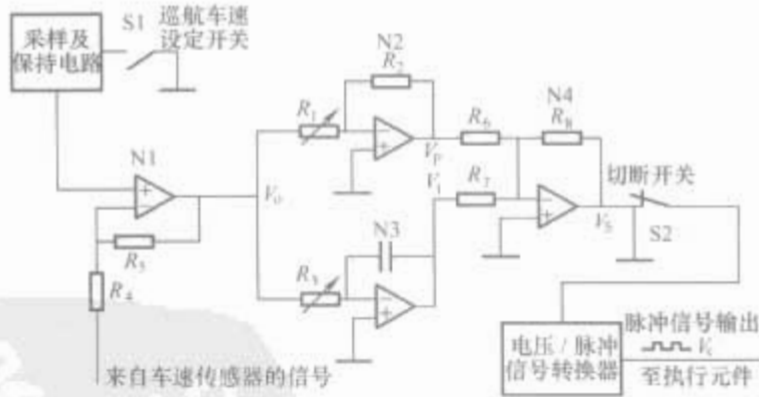


图 1.3-25 巡航控制 ECU 工作原理

随着数字技术的发展，巡航控制系统已全部采用数字式微机控制，其组成如图 1.3-26 所示。数字式微机控制巡航控制系统的控制原理与模拟电路基本相同，区别主要在于所有输入信号均以数字信号直接存储和处理；带可擦除只读存储器的 8 位微处理器，根据设定车速、实际车速及其他输入信号，按照给定程序完成所有的数据处理之后，产生一输出信号，驱动步进电动机执行元件工作。为确保安全，将制动开关与执行元件直接相连，当踩下制动踏板时，在断开巡航控制程序的同时，停止执行元件的工作，从而保证节气门完全关闭。与模拟系统相比较，数字电路的突出优点是系统中的信号以数字量表示，不受工作温度和湿度的影响，因此稳

定性更高。此外,由于数字式巡航控制 ECU 采用先进的大规模或超大规模集成电路技术制成专用集成块,只需修改一下程序就可将所需功能通过编程附加到汽车其他控制系统的 ECU 上,可省去昂贵的控制硬件。

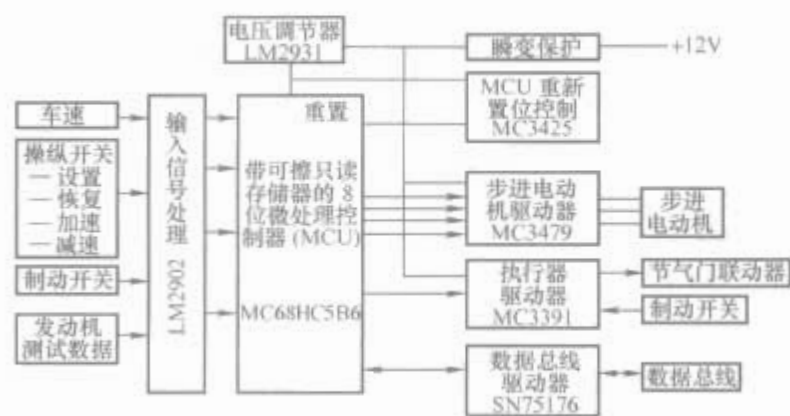


图 1.3-26 数字式微机巡航控制系统

1.9.1.5 执行元件

执行元件的功用是执行 ECU 的指令,控制节气门的开度。巡航控制执行元件主要有两种类型:电动机式和气动膜片式。

1.9.2 巡航控制系统的功能

巡航控制系统是 20 世纪 60 年代发展起来的,又称恒速行驶系统。巡航控制系统工作时,ECU 根据各种传感器输送来的信号判断汽车的运行工况,通过执行元件自动调节节气门的开度,使汽车的行驶速度与设定的车速保持一致。汽车在良好路面上长时间行驶时,驾驶员起动巡航控制系统并设定行驶速度,不需驾驶员操纵加速踏板,巡航控制系统即可自动保持汽车按设定的车速行驶,不仅减轻了驾驶员的劳动强度,同时利用先进的电子控制技术控制节气门的开度,比驾驶员操纵控制节气门开度更精确,汽车燃料经济性、排放污染性等也可得到改善。

汽车进入巡航控制状态后,若车速过低(一般为小于 40km/h)、汽车急减速(一般减速度超过 2m/s^2)或 ECU 检测到系统有故障时,ECU 将自动解除巡航控制。在进行巡航控制时,系统的主要功能包括:

(1) 匀速控制功能。在巡航控制过程中,ECU 对车速传感器的信号与设定的巡航控制车速进行比较,并根据比较结果反馈给控制执行元件,修正节气门开度,使汽车以设定的巡航控制车速匀速行驶。

(2) 巡航控制车速设定功能。汽车在巡航控制车速范围(40~200km/h)内行驶时,通过操纵开关设定巡航控制车速。巡航控制 ECU 将设定时的车速存储于 ECU 存储器内,并使汽车保持这个速度行驶。

(3) 滑行功能。当汽车以巡航控制模式行驶时,若接通设置和滑行(SET/COAST)开关后不松开,执行器就会关闭节气门,使汽车减速滑行。当松开设置和滑行开关时,ECU 便将此时的车速存储,并保持此车速行驶。

(4) 加速功能。当汽车以巡航控制模式行驶时,若接通设置和加速(SET/ACC)开关,执行器就会将节气门适当开启,使汽车加速行驶。当松开设置和加速开关时,ECU 将此时的车速存储,并保持此车速行驶。

(5) 恢复功能。只要行驶车速在 40km/h 以上,若用取消开关以手动的方法将巡航控制模式解除,接通设置和加速开关,即可恢复设定车速。若车速低于 40km/h,存储器中的巡航控制车速就会被清除,原设定车速也就不能恢复。

(6) 车速下限控制功能。车速下限是巡航控制所能设定

的最低车速,约为 40km/h,巡航控制不能低于这个速度。当汽车以巡航控制模式行驶时,若车速降至 40km/h 以下,巡航控制就会自动解除,设置在存储器的车速也被清除。

(7) 车速上限控制功能。车速上限是巡航控制所能设定的最高车速,约为 200km/h。即使操作加速(ACC)开关,也不能使车速超过 200km/h。

(8) 手动解除功能。当汽车以巡航控制模式行驶时,若通过手动操作使真空驱动执行器内的释放阀和控制阀同时关断,或电动机驱动执行器关断执行器内的电磁离合器,巡航控制就会解除。

(9) 自动解除功能。当汽车以巡航控制模式行驶时,当出现伺服调速电动机或安全电磁阀晶体管驱动电流过大、伺服电动机始终朝节气门打开方向转动时,存储器中设置的车速被清除,安全电磁阀离合器断电,巡航控制自动解除,控制开关同时关闭。在汽车处于巡航控制行驶期间,若出现车速低于 40km/h,巡航控制系统的电源中断时间超过 5ms,巡航控制也会自动解除。

(10) 自动变速器控制功能。在巡航控制模式下,汽车以超速挡上坡行驶,当车速降至超速挡切断速度(设定车速减去 4km/h)时,ECU 自动降挡以增加驱动力,防止车速进一步降低。当车速升至超速挡恢复速度(设定车速减去 2km/h)时,约 6s 后巡航控制 ECU 会自动恢复超速挡行驶。

(11) 快速修正巡航控制车速功能。当实际车速与设定车速相差不足约 5km/h 时,每次迅速(在 0.6s 以内)操纵设置和滑行开关,可将设定车速降低约 1.65km/h;当实际车速与设定车速相差不足约 5km/h 时,每次迅速(在 0.6s 以内)操纵设置和加速开关,可将设定车速提高约 1.65km/h。

(12) 自诊断功能。巡航控制 ECU 对系统进行监控,当发生故障时,ECU 接通组合仪表上故障指示灯电路,以提示驾驶员;同时,ECU 存储相应的故障代码,故障代码可通过故障指示灯读取。

1.10 柴油发动机电子控制系统

1.10.1 柴油发动机电控燃油喷射系统的组成

柴油机电控燃油喷射系统和汽油机电控燃油喷射系统有很大的不同。在汽油机电控燃油喷射系统中,喷油量完全是由喷油时间决定的,即控制了喷油时间就控制了喷油量,而且汽油机对喷油正时的要求也不高。柴油机电控燃油喷射系统除了控制喷油量外,对喷油正时和喷油的压力都有很高的要求。柴油机的喷油压力,采用分隔式燃烧室的柴油机为 9.8~12.7MPa,采用统一式燃烧室的柴油机喷油压力高达 19.6MPa;汽油机电控燃油喷射系统的喷油压力一般只需 196~294kPa。很明显,柴油机电控燃油喷射系统的喷油压力较高。在较高的供油压力下,通过电磁阀的开闭决定喷油量的多少,难度是比较大的,因为要用电磁力来克服高达 19.6MPa 的油压来打开电磁阀是很困难的。

此外,由于传统的柴油机燃料供给系统中,就有结构甚至工作原理完全不同的柱塞式喷油泵、转子分配式喷油泵、泵喷油器一体的“P-T”燃油系统等,因此形成了柴油机电控燃油喷射系统的多样化、执行元件的结构复杂等特点。各种柴油机电控系统的区别在于控制功能、传感器的数量和类型、执行元件的类型、ECU 控制软件、主要电控元件的结构原理和安装位置,但基本组成与其他的电子控制系统一样,也是由传感器、ECU 和执行元件三部分组成的,如图 1.3-27 所示。

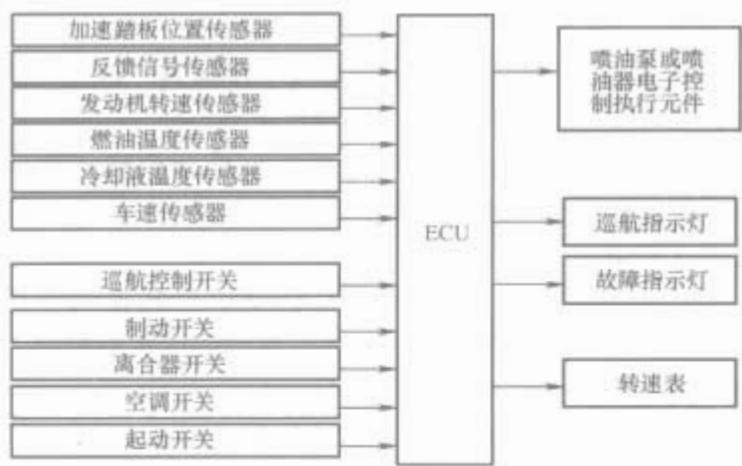


图 1.3-27 柴油机电控燃油喷射系统的组成

1.10.1.1 传感器

传感器(包括信号开关)用来检测柴油机与汽车的运行状态,并将检测结果转换成电信号输送给 ECU。柴油机电控燃油喷射系统所用的传感器多数与汽油机电控系统相同。

(1) 加速踏板位置传感器。加速踏板位置传感器用来检测加速踏板所处位置,ECU 根据此传感器信号间接判断柴油机的负荷,并作为控制柴油机喷油量和喷油正时的主控制信号。常用的加速踏板位置传感器有电位计式和差动电感式。

1) 电位计式加速踏板位置传感器。如图 1.3-28 所示,其结构和工作原理与汽油机电控系统节气门位置传感器基本相同。

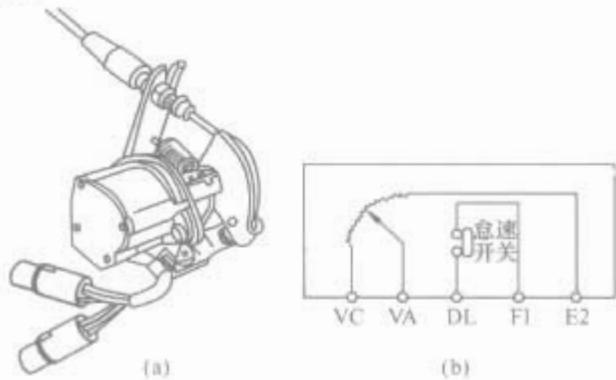


图 1.3-28 电位计式加速踏板位置传感器
(a) 传感器外形; (b) 内部电路

2) 差动电感式加速踏板位置传感器。如图 1.3-29 所示,传感器主要由铁心、感应线圈和线束连接器等组成。推杆与加速踏板联动,铁心与推杆做成一体。当加速踏板的位置发生变化时,铁心在两个线圈中移动,使两个线圈内的自感电动势发生一增一减的变化,根据输出端线圈的电压信号即可确定加速踏板的位置。

(2) 反馈信号传感器。柴油机电控燃油喷射系统一般对

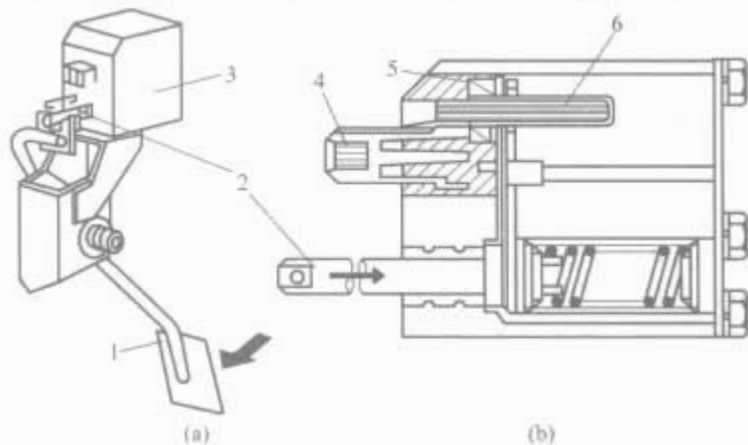


图 1.3-29 差动电感式加速踏板位置传感器
(a) 传感器外形; (b) 内部结构
1—加速踏板; 2—推杆; 3—加速踏板位置传感器;
4—线束连接器; 5—线圈; 6—铁心

供(喷)油量和供(喷)油正时采用闭环控制。反馈信号传感器就是指闭环控制系统中用来检测控制系统执行元件实际位置的传感器,在柴油机电控燃油喷射系统中主要包括负荷传感器(如供油齿条位置传感器、滑套位置传感器、喷油压力传感器等)和正时传感器(如分配泵正时活塞位置传感器、着火正时传感器等)两大类。

在不同柴油机电控燃油喷射系统中,由于控制供(喷)油量和供(喷)油正时的执行元件不同,负荷传感器和正时传感器的名称、数量和类型也不同。传感器通常采用电位计式、差动电感式或电磁感应式,其结构原理与用于其他用途的同类传感器基本相同。在有些柴油机电控燃油喷射系统中,装用光电式点火正时传感器(见图 1.3-30)来检测气缸内混合气燃烧的开始时刻。当气缸内的混合气燃烧时,传感器内的光敏晶体管产生电压信号输出,ECU 根据此信号判断实际着火开始时刻,并对喷油正时进行修正。

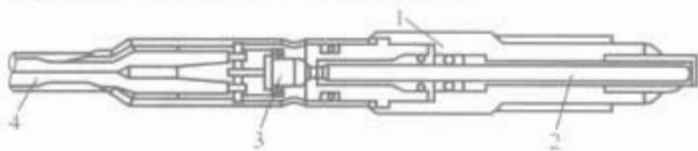


图 1.3-30 光电式点火正时传感器
1—壳体; 2—石英晶体; 3—光敏晶体管; 4—线束连接器

(3) 燃油温度传感器。柴油的温度直接影响其黏度,燃油温度传感器用来检测柴油的温度变化,ECU 根据此传感器信号对喷油量进行修正。燃油温度传感器一般采用热敏电阻式,其结构原理与进气温度传感器基本相同。

(4) 其他传感器和信号开关。其他传感器和信号开关,如发动机转速传感器(或凸轮轴/曲轴位置传感器)、车速传感器、冷却液温度传感器、制动开关、空调开关、E/G 开关(点火开关)等的功用、结构和工作原理与汽油机电控系统基本相同。

1.10.1.2 柴油机控制 ECU

柴油机电控燃油喷射系统所用的 ECU 组成框图如图 1.3-31 所示,其功用是根据各传感器输入信号和内存程序,计算出供(喷)油量和供(喷)油开始时刻,并向执行元件发出执行信号。柴油机控制 ECU 的结构与汽油机电控燃油喷射系统基本相同,主要是控制程序有较大差别。

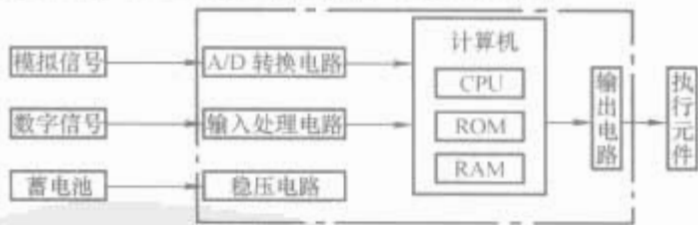


图 1.3-31 柴油机电控燃油喷射系统 ECU

1.10.1.3 执行元件

执行元件主要是执行 ECU 的指令,调节柴油机的供(喷)油量和供(喷)油正时。不同的柴油机电控燃油喷射系统的执行元件有很大差别。常用的执行元件有电子调速器、正时控制电磁阀、供油齿条控制电磁阀、滑套控制电磁阀、分配泵或喷油器回油控制电磁阀等。

1.10.2 柴油发动机电控系统的各部分功能

随着柴油机电控技术的发展,柴油机电控系统从最基本的燃油喷射控制,即供(喷)油量控制和供(喷)油正时控制,已扩展到包括对供(喷)油速率控制和喷油压力控制在内的多个目标控制的燃油喷射控制;并从单一的燃油喷射控制扩展到包括怠速控制、进气控制、增压控制、排放控制、起动控制、巡航控制、故障自诊断、失效保护、发动机与变速器的

综合控制等在内的全方位集中控制。

1.10.2.1 燃油喷射控制

燃油喷射控制主要包括供(喷)油量控制、供(喷)油正时控制、供(喷)油速率控制和喷油压力控制等。

(1) 供(喷)油量控制。供(喷)油量控制是柴油机电控燃油喷射系统最主要的控制功能之一。在起动、怠速、正常运行等各种工况下, ECU 根据发动机转速信号、负荷信号(加速踏板位置信号)和内存控制模型来确定基本供(喷)油量, 再根据冷却液温度信号、进气温度信号、起动开关信号、空调开关信号、反馈信号等对供(喷)油量进行修正。

(2) 供(喷)油正时控制。供(喷)油正时控制也是柴油机电控燃油喷射系统最主要的控制功能之一。在柴油机电控燃油喷射系统中, ECU 根据发动机转速信号、负荷信号和内存的控制模型来确定基本的供(喷)油提前角, 再根据反馈信号进行修正。柴油机基本供(喷)油提前角控制模型如图 1.3-32 所示。

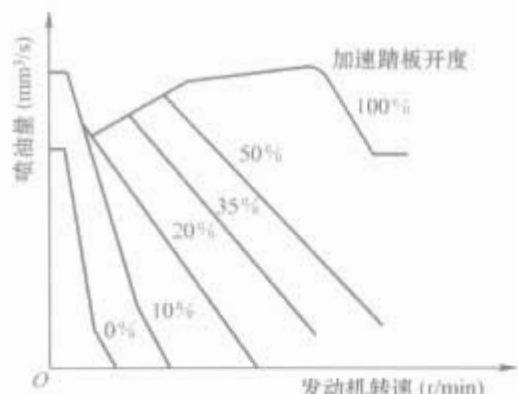


图 1.3-32 柴油机供(喷)油量控制模型

(3) 供(喷)油速率和供(喷)油速率的控制。在柴油机电控燃油喷射系统中, ECU 以柴油机转速信号和负荷信号作为主控制信号, 按预设的程序确定最佳的供(喷)油速率和供(喷)油规律。

(4) 喷油压力的控制。同样地, ECU 以柴油机转速信号和负荷信号作为主控制信号, 按预设的程序确定最佳的喷油压力, 并对喷油压力进行闭环控制。

(5) 柴油机低油压保护。柴油机机油压力过低时, ECU 根据机油压力传感器信号减少供(喷)油量, 降低转速并报警; 当机油压力降到一定值以下时, 则切断燃油供给, 强制发动机熄火。

(6) 增压器工作保护。装有增压装置的柴油机, 增压压力过高, 会造成中冷器和气缸内最高压力升高; 增压压力过低, 则会导致进气量不足使排气温度升高。因此, ECU 根据增压压力信号适当调节供(喷)油量, 并在增压压力过高或过低时报警。

1.10.2.2 怠速控制

柴油机的怠速控制主要包括怠速转速控制和怠速时各缸均匀性的控制。

(1) 怠速转速的控制。怠速工况时, ECU 以柴油机转速信号和负荷信号作为主控制信号, 按内存程序确定怠速时的供(喷)油量, 并根据冷却液温度信号、进气温度信号、空调开关信号、转速(反馈)信号等, 对怠速供(喷)油量进行修正控制, 使怠速转速保持稳定。

(2) 各缸均匀性的控制。在共轨式第二代柴油机电控燃油喷射系统中, 由 ECU 分别对各缸的喷油器进行控制(顺序喷射控制), ECU 可以通过精确测定曲轴转速、根据各缸做功行程中曲轴转速的变化确定各缸供(喷)油量的偏差, 然后进行补偿调节。

1.10.2.3 进气控制

柴油机的进气控制主要包括进气节流控制、可变进气涡流控制和可变配气正时控制。

(1) 进气节流控制。ECU 主要根据柴油机转速信号和负荷信号, 控制设在进气管中的节气门开度, 以满足不同工况对进气流量的不同要求。

(2) 可变进气涡流控制。ECU 以柴油机转速和负荷作为主控制信号, 按内存的程序对进气涡流强度进行控制, 以满足不同工况对进气涡流强度的不同要求。

(3) 可变配气正时控制。ECU 根据柴油机转速信号和负荷信号, 按内存程序对配气正时进行控制, 以满足不同工况对配气正时的不同要求。

1.10.2.4 增压控制

柴油机的增压控制主要是由 ECU 根据柴油机转速信号、负荷信号、增压压力信号等, 通过控制废气旁通阀的开度或废气喷射器的喷射角度、增压器涡轮废气进口截面大小等措施, 实现对废气涡轮增压器工作状态和增压压力的控制, 以改善柴油机的扭矩特性, 提高加速性能, 降低排放和噪声。

1.10.2.5 排放控制

柴油机的排放控制主要是废气再循环(EGR)控制, 按内存程序控制 EGR 阀的开度, 以调节 EGR 率。

1.10.2.6 起动控制

柴油机起动控制主要包括供(喷)油量控制、供(喷)油正时控制和预热装置控制, 其中供(喷)油量控制和供(喷)油正时控制与其他工况相同。柴油机冷起动时的预热装置一般都是电加热装置(如进气预热塞等), ECU 根据柴油机起动时的冷却液温度决定电加热装置是否通电及通电持续时间, 并在柴油机起动后或起动温度较高时, 自动切断电加热装置电源。

1.10.2.7 巡航控制

带有巡航控制功能的柴油机电控系统, 当通过巡航控制开关选定巡航控制模式后, ECU 即可根据车速信号等自动维持汽车以一定车速行驶。

1.10.2.8 故障自诊断和失效保护

柴油机电控系统中也包含故障自诊断和失效保护两个子系统。柴油机电控系统出现故障时, 自诊断系统将点亮仪表盘上的“故障指示灯”, 提醒驾驶员注意, 并储存故障码, 检修时可通过一定的操作程序调取故障码等信息; 同时失效保护系统启动相应保护程序, 使柴油能够继续保持运转或强制熄火。

1.10.2.9 柴油机与自动变速器的综合控制

在装用电控自动变速器的柴油车上, 将柴油机控制 ECU 和自动变速器控制 ECU 合为一体, 实现柴油机与自动变速器的综合控制, 以改善汽车的变速性能。

2 汽车自动变速器控制系统

现代汽车上广泛采用活塞式内燃发动机。由于发动机的转矩变化范围较小, 因此不能适应汽车在各种道路条件下行驶的要求。为了满足汽车的牵引力和车速能在相当大的范围变化的要求, 在汽车传动系中, 采用了可以改变转速比和传动转矩比的装置即变速器。变速器是汽车底盘中的主要总成之一, 它与发动机配合工作, 使汽车具有良好的动力性能和经济性能。汽车变速器可以扩大发动机传给驱动车轮上的转矩和转速的变化范围, 以适应汽车在各种条件下行驶的需要。变速器能在保持发动机转动方向不变的情况下实现倒车, 还能利用空挡暂时切断发动机与传动系统的动力传递,

使发动机处于怠速运转状态。正确操纵变速器是驾驶员一项重要技能和繁重的工作。为提高驾驶操作的轻便性,减轻驾驶员的疲劳程度,提高汽车的动力性和经济性,人们在改进变速器的结构和换挡方法上作了很大的努力,目前已经广泛使用的自动变速器就是其中的代表。

2.1 自动变速器电控系统基本工作原理

2.1.1 自动变速器电控系统组成及原理

自动变速器的机械传动部分由液力变矩器和齿轮变速器构成,这一部分使自动变速器可以在不中断发动机动力传递的状态下进行挡位的变换。控制系统根据自动变速器选择挡的位置以及汽车的行驶状态,按照设定的换挡规律,在汽车行驶的过程中自动选择挡位,并通过控制换挡执行元件的工作改变齿轮变速器(一般是指行星齿轮结构)的传动比,从而实现挡位的自动变换。

自动变速器一般由能源部分、换挡选择机构、控制参数信号发生变换器、换挡控制器、换挡执行机构及换挡品质控制机构6部分组成,其结构框图如图1.3-33所示。



图 1.3-33 自动换挡系统结构框图

(1) 换挡系统能源部分。换挡系统能源部分是整个控制系统各个机构的动力源。对液压系统,它由液压泵、调压阀、滤油器、冷却器、油箱及传动介质等组成;对电控液动式控制系统,除上述供油系统外,还需电源为控制电路提供所需电压。

(2) 换挡范围与换挡规律选择机构。换挡范围与换挡规律选择机构是为驾驶员提供干预自动换挡系统的机构。换挡范围选择的作用是限制自动换挡的排挡范围。在全液压系统中,此机构为选择阀;在电控液动系统中,此机构为挡位指示器和为驾驶员提供按负载与路况选择换挡规律的换挡规律选择器。

(3) 控制参数信号变换器。自动换挡系统是按控制参数的变化实现换挡的,因此系统中必须设有反映该参数的信号发生变换的环节。常用的是两参数控制,对全液压式控制系统,将车速、油门开度调制为液压信号的机构是速度调压阀和油门调压阀;在电控液动系统中,将车速、油门开度调制为电压信号的机构是电磁转速传感器和油门电位器。液力变矩器的闭锁与解锁也是一个机械挡与液力挡的相互转换过程,也有类似控制参数信号转换问题。

(4) 换挡控制器。换挡控制器接受来自换挡信号变换器及换挡选择机构传来的信号,进行比较和处理,按预定的规律选择挡位和换挡时刻,同时发出相应的换挡指令,控制换挡执行机构进行换挡动作。对全液压系统,该功能由换挡阀或由换挡信号阀和继动阀共同来实现;对电控液动系统,则由电子控制单元换挡控制器与电磁阀实现。

(5) 换挡执行机构。换挡执行机构的功能是接受换挡指令,完成换挡操作。换挡执行机构主要包括离合器、制动器、换挡拨叉及其动作油缸等。换挡动作的完成通过油缸的充、卸压力油来实现。

(6) 换挡品质控制机构。换挡品质控制机构的功能是控制换挡过程平稳、无冲击,防止产生大的载荷。一般是在通

向液压缸的油路上,设置蓄能器、缓冲阀、定时阀、执行油压阀等。

2.1.2 自动变速器控制系统的分类

按照控制方式来说,自动变速器以全液压式(液控液动)、电控液动式为主。液压控制自动变速器和电控自动变速器中的液力变矩器、油泵、行星齿轮变速器三部分的结构及工作原理是完全相同的,不同之处是自动换挡控制系统的工作原理(换挡点的选择及发生换挡信号等)不同,液压式控制系统是完全利用液压制动控制原理来完成其主要控制任务的,油门开度和车速信号是以机械的方式传入控制系统,并利用流体力学的原理转化为相应的液压控制信号,控制系统根据这两个液压控制信号的变化进行各种自动控制工作。电控液动式系统是利用电子自动控制的原理来完成控制任务,传感器将汽车及发动机的运转参数转变为电信号,根据这些信号,处理器依据设定好的程序发出控制信号,通过各种电磁阀操纵阀体总成中各阀门的工作,来完成各种控制任务。

相对于全液压式控制系统,电控液动式控制系统具有以下优点:

(1) 由于计算机能存储与处理多种换挡操作,所以它可以按车辆行驶需要对相应规律进行选择,可以实现更复杂、更合理的控制,即一机多能;可以突破液压阀结构的限制,获得更加理想的燃料经济性和动力性。

(2) 自动换挡系统变更规律或参数时,只需要改变某些元件的型号规格或调整局部线路,就能达到要求,而无需对变速器结构零件做任何变动,所以适应性强,开放周期短,在系列产品中更能显示其优越性。

(3) 可大大简化液压系统,从而使结构紧凑、重量轻。

(4) 控制精度高、反应快、动作准确。

(5) 与整车的其他控制系统,如发动机控制、牵引力控制系统等兼容性好。

2.2 变矩器与变速器

2.2.1 变矩器

自动变速器使用变矩器把发动机输出的转矩传递给变速器,变矩器用变速器油作为介质,不仅传输而且还成倍增大来自发动机的转矩。

变矩器是一个环状装置,其内部充满了自动变速器油(ATF),位于发动机和变速器之间。在变矩器内部有三个主要元件:泵轮、蜗轮和导轮。它们都有为了提高液力变矩器效率的曲面叶片。泵轮由曲轴驱动,蜗轮转轮与变速器输入轴连接,定轮由单向离合器及定轮轴与变速器壳体固定。所有这些部件则全部安装于变矩器壳体内。变矩器结构如图1.3-34所示。

变矩器使转矩成倍放大,是由液体流过蜗轮后,借助定轮叶片流回泵轮而实现的。发动机产生的转矩,再加上从蜗轮转轮流回的液体的转矩驱动泵轮,泵轮使原来传送至蜗轮转轮的输入转矩成倍放大。

泵轮由发动机驱动,引导液体冲击蜗轮叶片,使叶片转动而驱动蜗轮轴,蜗轮轴作为变速器的输入轴。导轮位于泵轮和蜗轮之间,使油液从蜗轮返回泵轮,从而循环流动。变矩器在某些工况下具有增大转矩作用。在大负荷工况下,变矩器提供额外减速以适应增大转矩的需要。当汽车以巡航车速行驶时,变矩器转入离合器工作状态,把发动机的转矩传递到变速器。变速器也吸收来自变速器变换挡位的冲击。通过变速器液并不能把发动机的全部功率传递到变速器,总存在一些损失。为了降低变矩器的功率损失,特别是以巡航车

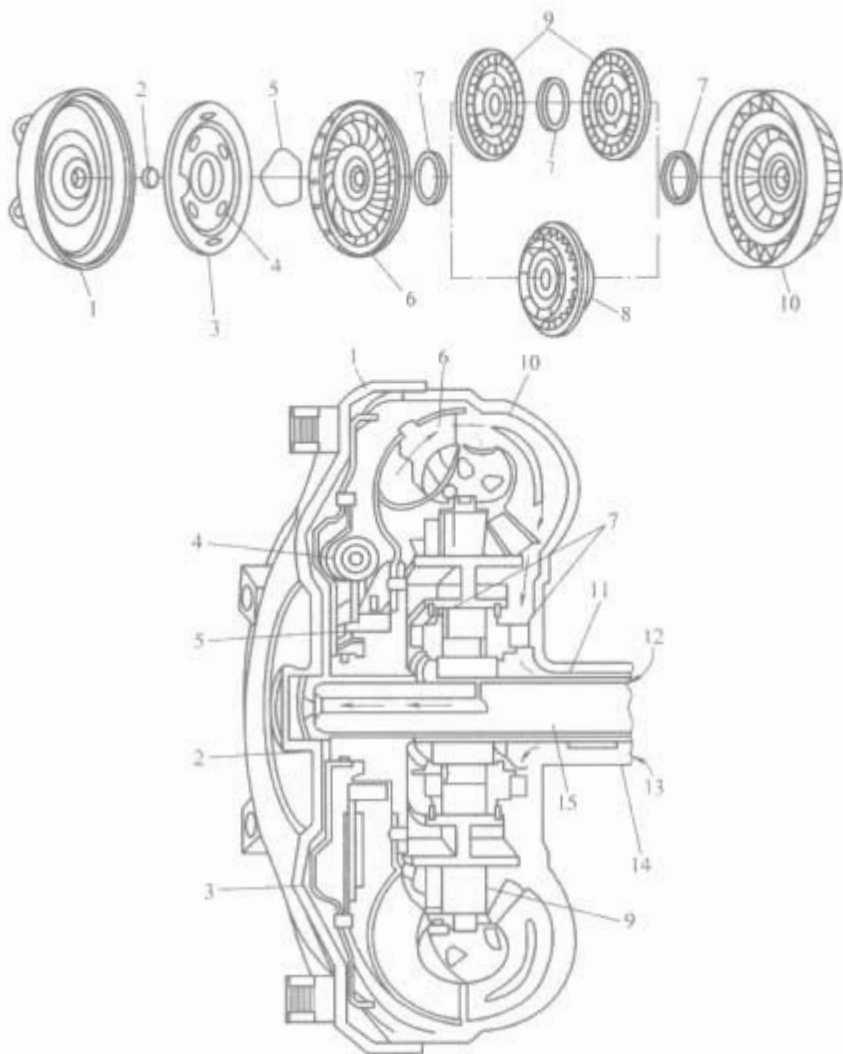


图 1.3-34 典型液力变矩器的结构

1—变矩器壳盖组件；2—蜗轮止推垫片；3—压盘组件；4—减震器组件；5—压盘弹簧；6—蜗轮组件；7—止推轴承组件；8—单导轮组件；9—双导轮组件；10—变矩器泵轮组件；11—导轮轴；12—分离油液；13—接合油液；14—变矩器；15—蜗轮轴

速行驶时的功率损失，多数现代变速器都装备带有锁止离合器的液力变矩器。

锁止离合器是否接合取决于发动机转速和车速，并且由变速器液力和单板机电控控制。当锁止离合器接合时，发动机和驱动轮之间为机械连接，因此提高了总效率和燃油经济性。

变矩器的工作过程概述如下：

(1) 车辆停住，发动机怠速运转。发动机怠速运转时，发动机自身产生的转矩最小。如使用了制动器驻车，此时蜗轮上的载荷量大，这是因为蜗轮转轮无法转动。但是，由于车辆停住时，蜗轮转轮与泵轮的转速比为零，而转矩比却最大，所以蜗轮总是随时准备以大于发动机所产生的转矩转动。

(2) 车辆起步时。当制动器松开时，蜗轮转轮就能与变速器输入轴一起转动，所以在加速踏板踩下时，蜗轮转轮就以大于发动机所产生的转矩转动，于是车辆开始前进。

(3) 车辆低速行驶时。随着车速提高，蜗轮转轮的转速迅速接近泵轮的转速，转矩比也迅速接近 1。当蜗轮与泵轮的转速比接近某一值(耦合器工作点)时，导轮开始转动，转矩成倍放大效应下降。换言之，变矩器开始仅作为液力耦合器运作，所以车速几乎与发动机转速成正比地直线上升。

(4) 车辆以中、高速行驶时。这时，变矩器仅仅起到液力耦合器的作用。蜗轮转轮以与泵轮几乎一样的转速转动。

在车辆正常起动的过程中，变矩器在发动机发动以后 2~3s 达到耦合点。但是如果载荷太大，即使车辆以中、高速行驶，变矩器也有可能在变矩区运行。

变矩器的性能参数包括：

(1) 转矩比。由于变矩器的作用，在变矩区转矩与涡流速度成比例增大，即在蜗轮转轮停转时，转矩达到最大。变矩器的运作分为两个工作区域：①变矩区，转矩成倍放大；②耦合区，只是传送转矩而并无转矩放大。耦合器工作点就是这两个区域的分界线。

(2) 失速点。指当转速比(ϵ)为零时，即蜗轮转轮完全不转动时(例如，当换挡杆量于“D”挡域而车辆被阻止前进时)，泵轮与蜗轮转轮间的转速差达到最大。失速点是指蜗轮转轮停转，或转速比(ϵ)为零时的定轮状态。而变矩器的最大转矩比出现在失速点，通常在 1.7~2.5。

(3) 耦合器工作点。指当蜗轮转轮开始转动，转速比上升时，蜗轮转轮与泵轮间的转速差开始下降的位置。当转速比达到某一规定值时，涡流变得最小。因而转矩比几乎为 1:1。由于从蜗轮转轮流出的液流以较高速比冲击定轮叶片的背面，单向离合器就使定轮与泵轮同向转动。换言之，变矩器在耦合器工作点时，开始起液力耦合器的作用，防止转矩比降至 1 以下。

(4) 传动效率。变矩器的传动效率是指泵轮得到的能量传送到蜗轮转轮的效率。这里所说的能量是指发动机本身的输出，且与发动机转速及转矩成正比。在失速点时，泵轮转动而蜗轮却停住不转，这对传送到蜗轮转轮的是最大转矩，但传动效率却为零，这是因为蜗轮并不转动。

当蜗轮转轮开始转动时，蜗轮转轮输出与泵轮转速及转矩成正比增加，使传动效率剧增，并在转速比达到耦合点前少许时达到最大值。而在达到传动效率最大值以后，传动效率开始下降，这是因为从蜗轮转轮流出的部分液体开始流到定轮叶片背面。

在达到耦合点时，来自蜗轮转轮的液流大部分冲击定轮叶片背面，定轮开始转动，使传动效率不致进一步下降。变矩器则开始如同液力耦合器一样发挥作用。

由于转矩在液力耦合器中是以几乎 1:1 传送的，在耦合区内的传动效率与转速比成正比直线上升。但是由于液流的摩擦及撞击，使液体温度上升，液流的循环使一部分功能消耗，所以变矩器的传动效率达不到 100%，通常仅为 95% 左右。

2.2.2 变速器

液力变矩器可以在一定范围内自动无级地改变转矩比和传动比，以适应行驶阻力的变化。但液力变矩器的变矩系数不够大，不能完全满足汽车使用的要求。因此，必须将其与齿轮式变速器组合使用，扩大传动比的变化范围，满足汽车行驶要求。

大部分自动变速器都采用行星齿轮系统与液力变矩器配合使用。行星齿轮系统由行星齿轮机构和执行机构两部分组成。执行机构根据自动变速器控制系统的命令放松或固定行星齿轮机构的某个元件，通过改变动力传递路线得到不同的传动比(挡位)。

一般的行星齿轮机构由三元件组成：太阳轮、齿圈和装有行星齿轮的行星架，如图 1.3-35 所示。齿圈又称齿环，制造有内齿，其余齿轮均为外齿轮。行星齿轮通过行星齿轮轴支撑在行星架上。整个行星齿轮机构装配好后，太阳轮位于中心，所有行星齿轮在于太阳轮外啮合的同时还与齿圈内啮合。这种行星齿轮机构也称单排行星机构。

液力变矩器将发动机的动力传递给三元件之一，若另外两元件中的一件被固定，则动力由另一件输出。行星齿轮机构有多条动力传递路线，动力经不同路线传递可得到不同的传动比。动力传递路线取决于二元件的相对运动状态。其中

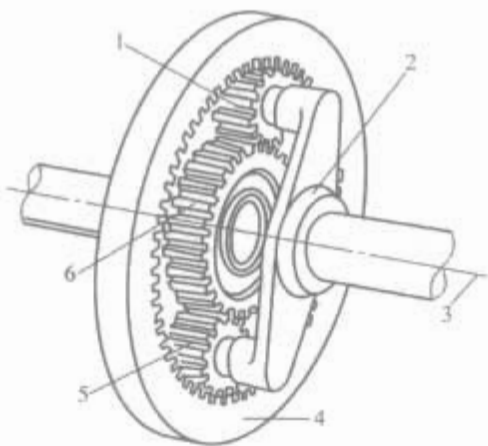


图 1.3-35 简单的行星齿轮结构
1、5—行星齿轮；2—行星架组件；3—传动轴线；
4—齿圈；6—太阳轮

行星齿轮有三种运动方式：①行星齿轮静止不动，随着行星架绕太阳轮旋转——公转；②在静止的行星架上绕行星齿轮轴旋转——自转；③既有自转又有公转。动力传递路线不同，行星齿轮的运动状态是不同的。

由于在单排行星齿轮机构中，行星齿轮只起中间轮(惰轮)的作用、因此单排行星齿轮机构的传动比取决于太阳轮齿数 Z_1 和齿圈齿数 Z_2 ，与行星齿轮的齿数无关。在太阳轮、齿圈和行星架这三个基本元件中，可以任选其中两个基本元件分别作为主动件和从动件，只要第三个基本元件有确定的转速(0 或某一数值)，即可计算出该机构的传动比，下面分别讨论各种可能的情况。

- (1) 将齿圈固定，以太阳轮为主动件。行星架为从动件，即可获得减速传动。由于齿圈的齿数 Z_2 大于太阳轮的齿数 Z_1 ，因而这一传动比的数值要大于 2。
- (2) 将太阳轮固定，以齿圈为主动件，行星架为从动件，即可获得加速传动，由于太阳轮的齿数 Z_1 小于齿圈的齿数 Z_2 ，因而这一传动比小于 2、大于 1。
- (3) 将太阳轮固定，以行星架为主动件，齿圈为从动件，此时传动比小于 1，因此是增速传动，相当于超速挡。
- (4) 若将行星架固定，则行星齿轮的轴线也被固定，行星齿轮只能自转，不能公转，行星排为一个定轴式齿轮传动机构，而且太阳轮和齿圈的转向相反。此时若以太阳轮为主动件，齿圈为从动件，即可获得反向减速传动，此时相当于倒挡。
- (5) 若三个基本元件都没有被固定，各个基本元件都可以自由转动，则此时该机构具有两个自由度，因此不论以哪两个基本元件为主动件、从动件，都不能获得动力传递，即此时该机构失去传动作用而处于空挡状态。
- (6) 若将任意两个基本元件互相连接起来，则由行星排的运动特性可知，第三个基本元件的转速必与前两个基本元件的转速相同，即 3 个基本元件将以同样的转速一同旋转。此时不论以哪两个基本元件为主动件、从动件，其传动比都是 1。这种情况相当于直接挡。

对于多排行星齿轮机构来说，其变速的工作原理类似。

自动变速器的执行机构直接控制行星齿轮机构的工作，使其按不同路线传递动力。常见执行机构有三种形式：多片离合器、单向离合器和制动器。它们可分为两种类型，一种是将蜗轮的输出轴与行星齿轮机构三元件之一连接成一体驱动元件，另一种是使三元件之一被

固定的锁止元件。

2.3 液压控制系统

液压控制系统是利用液压控制原理来完成主要控制任务的。这种系统是利用节气门开度和车速机械方式输入控制系统，并利用液压原理转化为液压控制信号，控制系统根据转化后的两个信号的变化，控制作用在变矩器、离合器及制动器上的液压，实现自动换挡的任务。其结构如图 1.3-36 所示。

液力式控制系统由油压调节装置、换挡控制装置和变矩器控制装置组成。液力控制系统中的各种控制阀大部分安装在液压阀体总成中，这些控制阀通过变速器壳和变速器轴上的油道与油泵、变矩器和各换挡执行元件相连通。

自动变速器控制系统的油压调节装置叫做主油路调节阀，或叫做主油路调压阀。自动变速器所有油压都是经过主油路调节阀调整后形成的，经调整后的油液充满液力变矩器、润滑变速器。为保证油路具有足够高的油压，防止油压过低，使离合器、制动器打滑而影响自动变速器换挡，主油路油压需要进行调整。

主油路调压阀工作原理如图 1.3-37 所示。自动变速器的油泵由发动机直接驱动。当油泵运转时，由油泵泵出的压力油经油道进入调压阀下端的 A 腔。当 A 腔油压小于调压阀上端调压弹簧预紧力时，调压阀下移到底端。这时，泄油口关闭，油压上升。当 A 腔油压大于调压弹簧预紧力时，调压阀上升，将泄油口打开，油路中的部分液压油经泄油口回油底壳，使油压下降，直至 A 腔油压压力与调压弹簧预紧力平衡为止。经调整后的油压为主油路油压，无论发动机转速高低，主油路压力保持在 0.5~1MPa 范围内。

为满足自动变速器在不同工况时对主油路油压的需要，主油路调压器应能使主油路油压随发动机油门开度的增大而升高；而当油门开度较小时，主油路油压可以降低。当自动变速器处在直接挡或超速挡，汽车以较高车速行驶时，传动系统处在高转速、低扭矩状态工作，这时应降低主油路油压。倒挡时主油路油压比前进挡时的主油路油压大，一般为 1~1.5MPa。

一般主油路调压阀使用阶梯式滑阀，它可以根据来自几个控制阀的反馈油压的变化来改变调节主油路油压的大小，以满足不同工况时对主油路油压的要求。

换挡控制装置，由手动阀、换挡阀、节气门阀、调速阀等控制阀及相应的油路组成。

手动阀是一种多路换向阀，它安装在液压控制阀体中，

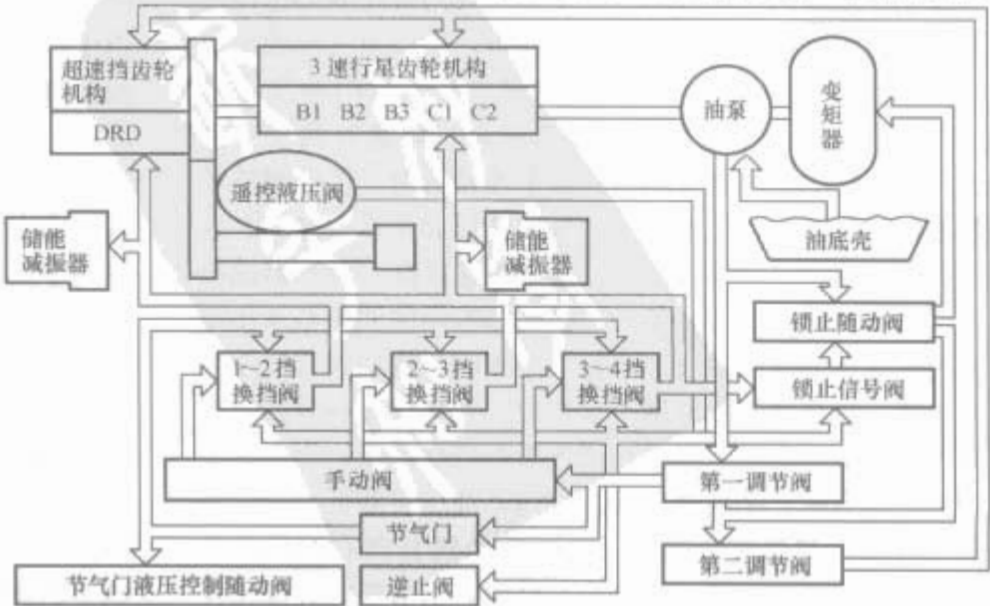


图 1.3-36 液压变速器液压系统简图

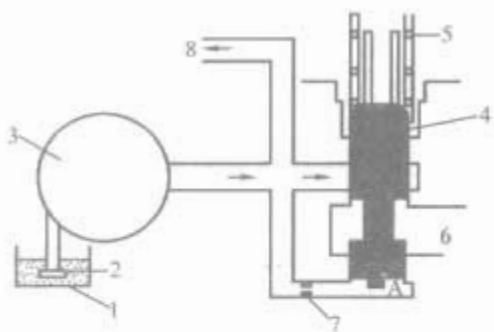


图 1.3-37 主油路调压阀工作原理

1—油底壳；2—滤网；3—油泵；4—调压阀；5—调压弹簧；6—泄油门；7—节流孔；8—至主油路

并通过拉杆与换挡手柄相连接，由驾驶员操纵，工作原理如图 1.3-38 所示。当驾驶员操纵换挡手柄于不同位置时，手动阀也随之移到相应位置，使进入手动阀的主油路与不同的控制油路相同，或直接把主油压送至相应的换挡元件，如前进离合器、倒挡离合器等，而不参加工作的控制油路与泄油口相通，进行泄荷，这时控制系统使自动变速器处于不同挡位进行工作。

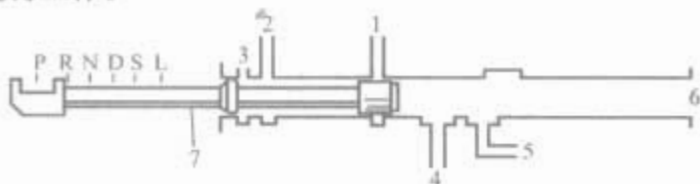


图 1.3-38 手动阀工作原理

1—主油路；2—倒挡油路；3—泄油口；4—前进挡油路；5—前进低挡油路；6—泄油口；7—手动阀

自动变速器在前进挡中，挡位的变换是通过换挡阀的工作实现的。换挡手柄在前进挡位置时，手动阀将主油路压力直接送入前进离合器或前进强制离合器，还将主油路油压送入换挡阀，换挡阀控制主油路油压再送入不同的换挡执行元件，使自动变速器进入不同的挡位。

换挡阀是液压控制 2 位换向阀。在换挡阀的右端作用着调速器油压，左端作用着节气门油压和换挡阀弹簧的弹力。左、右两端控制力的大小决定着换挡阀的位置。当右端调速器油压小于左端节气门油压和弹簧力之和时，换挡阀移至右端不动；而当右端油压大于左端油压时，换挡阀移至左端。当换挡阀改变方向时，打开或关闭主油路，或使油液流动方向发生变化，使主油路压力油进入不同的换挡执行元件，实现挡位的变换。换挡阀从右端移至左端，自动变速器升高两个挡位；换挡阀从左端移至右端时，自动变速器降低一个挡位。

自动变速器的升挡和降挡完全由节气门油压和调速器油压控制。而节气门阀由节气门拉线操纵，所以节气门油压由发动机的油门开度决定，油门开度越大，节气门油压也越大。调速器油压由车速决定，车速越高，调速器油压也越高。汽车行驶中油门保持不变，当车速较低时，换挡阀右端的调速器油压较小，低于左端节气门油压和弹簧力之和，这时换挡阀保持在右端低挡位置；随着车速提高，调速器油压增大，当车速增大到一定值时，换挡阀右端的调速器油压增大到超过左端节气门油压和弹簧力之和时，换挡阀移向左端高档位置，自动变速器升高一个挡位；如果汽车在高档上坡行驶因阻力增大车速下降时，调速器油压也降低，当车速下降至某一数值时，换挡阀右端的调速器油压将降低至小于左端节气门油压和弹簧力之和，这时换挡阀移向右端低挡位置，使自动变速器降低一个挡位。因此，当节气门开度不变时，汽车行驶过程中自动变速器的升挡和降挡时刻完全由车

速决定。

如果汽车行驶时保持较大的油门开度，换挡阀左端的节气门油压也较大，只有在较高车速下才能使调速器油压等于节气门油压和弹簧力之和，使自动变速器升挡，所以升挡车速要求较高；如果汽车行驶过程保持较小的油门开度，换挡阀左端的节气门油压也较小，调速器油压在车速较低时就能达到节气门油压和弹簧力之和，所以升、降挡车速较低。因此汽车自动变速器的升、降挡由油门开度决定，油门开度越大，汽车升、降挡车速越高；反之，油门开度越小，汽车升、降挡车速就越低。

节气门阀用来产生节气门油压，使控制系统根据节气门开度的大小改变主油路油压和换挡车速，以使自动变速器主油路油压和换挡规律能满足需要。节气门阀由节气门开度控制，分为机械式节气门阀和真空式节气门阀。

调速器用于产生调速器油压，它和节气门油压一起控制换挡阀的工作。调速器一般安装在自动变速器输出轴上，或安装在自动变速器壳体上，通过此轮与输出轴连接。调速器有泄荷式和节流式两种。

2.3.1 泄荷式调速器

主油路压力油经过节流口降压后成为调速器油压，调速器压力油分两路进入换挡阀和调速器。调速器通过控制泄油口的大小调整调速器油压。进入调速器的压力油推动滑阀，打开泄油口进行泄荷。因为调速器安装在变速器输出轴上，当输出轴转动时，由于离心力作用使滑阀外移，泄荷口关小。在输出轴转速低时，由于离心力小，滑阀不能完全关闭泄油口，泄油量多，调速器油压降低；在输出轴转速高时，由于离心力大，滑阀使泄油口关小，调速器油压升高。所以，调速器油压随着输出轴转速的增大而升高；而输出轴与车轮连接，调速器油压也随着车速的提高而增大。

调速器在低速和高速工况应有不同的工作特性，才能使自动变速器的换挡规律满足汽车的实际使用要求。所以在自动变速器中使用的调速器都是两级调速器。泄荷式两级调速器有两个离心块，分别控制两个泄荷口，以此来调节调速器油压。当输出轴驱动调速器旋转时，飞块在离心力和弹簧力的共同作用下张开，使泄油口上的钢球关小泄油口，油路中的调速器油压上升，直到油压等于飞块作用在钢球上的压力为止。两级调速器中的两个离心飞块的质量和弹簧弹力不同，使调速器在低速区和高速区具有不同的工作特性。大质量飞块为初级飞块，它的调速弹簧弹力小；小质量飞块为次级飞块，它的调速弹簧弹力大。在低速区工作时，由于调速器油压低，次级飞块在弹簧力的作用下关闭次级泄油口，这时调速器油压由初级飞块通过初级泄油口的开度进行调节。由于初级飞块质量大，它随着转速的增加，离心力增加较快，这时调速器油压随车速的提高而增大。在高速区工作时，由于初级飞块离心力大，已使初级泄油口关死，使调速器油压升高，直到推开次级泄油口的钢球为止，这时调速器油压由次级飞块控制。由于次级飞块质量小，所以调速器油压随车速的提高而缓慢增大。节气门阀产生的油压和调速器产生的油压共同控制换挡阀的工作。

2.3.2 节流式调速器

节流式调速器和泄荷式调速器在结构上相似。节流式调速器由阀体、滑阀、弹簧和重块组成。阀体与输出轴一起转动，滑阀和重块会在离心力作用下外移，使进油口打开，主油路压力油进入调速器，产生调速器油压。同时，作用在滑阀上的调速器油压使滑阀内移、进油口关小，直到调速器油压与滑阀所受离心力平衡为止。所以，输出轴转速越高，滑

阀所受到的离心力也越大，调速器油压也越大。

节流式两级调速器也安装在变速器输出轴上。它在低速区工作时，重块和滑阀在离心力的作用下一起外移，打开进油口，主油路压力油经进油口节流减压后成为调速器油压。作用在滑阀上的调速器油压使滑阀关小进油门，一直到调速器油压等于滑阀和重块的离心力之和为止。由于重块质量大，随车速的提高，调速器油压升高。当车速继续提高时，重块带动销轴逐渐外移，直到销轴内端的平面靠在调速器外壳的台阶上为止。此后车速再提高，重块也不再外移。所以在高速区工作时，调速器油压只靠滑阀的离心力调节。由于滑阀质量较小，它的离心力增大随转速的提高较缓慢，所以调速器油压随车速的升高而呈现缓慢增大。

两级式调速器在低速区和高速区内具有不同的工作特性。在低速区，由于调速器油压随车速变化较大，使自动变速器在汽车起步后及时地从低速挡升到中速挡，防止因为升挡不及时而使发动机转速过高，增加油耗。在高速区，由于调速器油压随车速变化比较小，使汽车从中速挡升到高速挡之前有足够的加速时间，防止升挡过早而影响动力发挥。

当节气门全开或接近全开时，强制降挡阀可以将自动变速器强制降低一个挡位，以使汽车获得良好的加速性能。强制降挡阀有两种类型：①由控制节气门阀的节气门拉线和节气门阀凸轮共同控制的强制降挡阀，它的工作原理是在节气门接近全开时，节气门拉线通过节气门阀凸轮推动强制降挡阀，使换挡阀油路开启，该油路的压力油作用在换挡阀上，迫使换挡阀移到低挡位置，自动变速器便自动降低一个挡；②由电磁阀控制的强制降挡阀，在加速踏板上安装有强制降挡开关或称跳台开关，用强制降挡开关控制电磁阀的结合，它的工作原理是当把加速踏板踩到底时，强制降挡开关闭合，使强制降挡电磁阀通电，电磁阀作用在阀杆上的推力消失，阀芯在弹簧力的作用下右移，使油路打开，主油路压力油进入各换挡阀的左端，也就是作用在节气门油压的一端，强制换挡阀右移，使自动变速器降低一个挡位。

在换挡控制装置中还有2挡锁定阀、缓冲阀、限流阀、压力校正阀等，它们用于控制挡位变化范围和改善换挡质量，使换挡执行元件接合柔和，换挡平稳、无冲击。

2.4 电子控制系统

液压控制自动变速器是利用节气门阀产生的油压和调速器产生的油压共同控制来实现自动换挡的。电控自动变速器的各项控制由电子控制系统和液压控制系统共同完成，是利用传感器、ECU及执行元件来完成换挡的任务。

自动变速器电液式控制系统由电子控制装置和液压阀体两部分组成。电子控制装置对发动机和自动变速器的工作进行检测，并根据检测结果和相应的控制程序操纵液压阀体中控制阀的工作，以驱动离合器、制动器、锁定离合器等换挡执行元件，实现对自动变速器的控制。

自动变速器电子控制装置由各种传感器、执行器、各种控制开关和电控组件(计算机)组成，如图1.3-39所示。电控组件是整个控制系统的中心，它根据各种传感器测得的发动机转速、车速、节气门开度、自动变速器油温等参数，通过电控组件分析运算，根据各种开关输入的指令和电控组件内设定的程序，向各个执行元件输出工作指令，操纵液压阀体内各种控制阀的工作，实现对自动变速器的控制。

2.4.1 各种传感器结构和工作原理

2.4.1.1 节气门位置传感器

电子控制自动变速器利用安装在发动机节气门体上的节

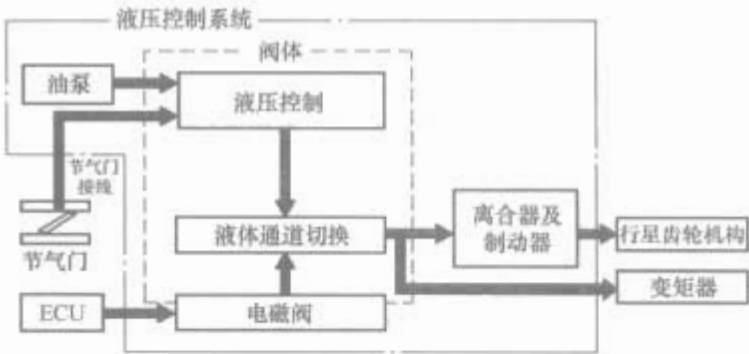


图 1.3-39 电控变速器液压系统简图

气门位置传感器来测得节气门的开度信号，作为电控组件控制自动变速器的依据，使自动变速器的换挡规律在任何条件下都能满足汽车的使用要求。

节气门位置传感器有几种不同的类型，使用自动变速器的汽车常用线性输出型节气门位置传感器，如图1.3-40所示。这种节气门位置传感器由一个线性电位计和一个怠速开关组成，它的两个触点与节气门轴联动，一个可在电阻体上滑动，利用电阻变化转换成电压值。这个线性电压可感知节气门开度，并把节气门开度信号输入电控组件。节气门关闭时，怠速开关接通，而当节气门开启时，怠速开关断开。当节气门处在不同开度时，电位计电阻不同。电控组件通过节气门位置传感器获得表示节气门由全闭到全开的开启角度连续变化的信号，并以此作为控制自动变速器在不同行驶条件下挡位变换的依据。

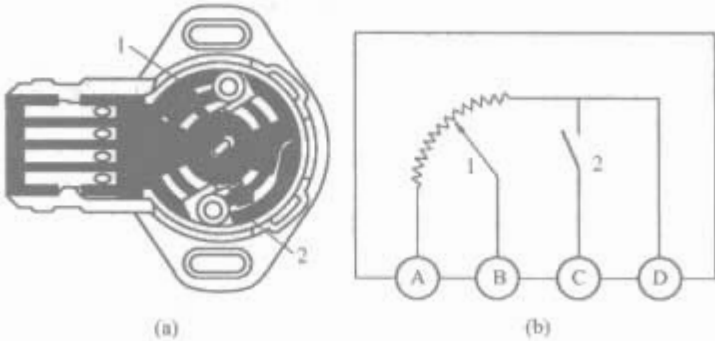


图 1.3-40 节气门位置传感器

1—怠速开关滑动触点；2—线性电位计滑动触点
A—电源电压(V_C)；B—节气门开度信号(V_{TA})；
C—怠速信号(IDL)；D—接地

2.4.1.2 车速传感器

车速传感器安装在自动变速器输出轴附近的壳体上，它是一种电磁感应式转速传感器，用于检测自动变速器输出轴转速。电控组件依据车速传感器输入的信号计算出车速，以此控制自动变速器的换挡。

车速传感器由永久磁铁和电磁感应线圈组成(见图1.3-41)，它被固定安装在自动变速器输出轴附近的壳体上，输出轴上的停车锁定齿轮为感应转子，当输出轴转动时，停车锁定齿轮的凸齿不断地靠近或离开车速传感器，使线圈内的磁通量发生变化，从而产生交流电压，其工作原理如图1.3-42所示。车速越高，输出轴转速也越高，感应电压脉冲频率也越高，电控组件根据感应电压脉冲频率的大小计算汽车行驶速度。

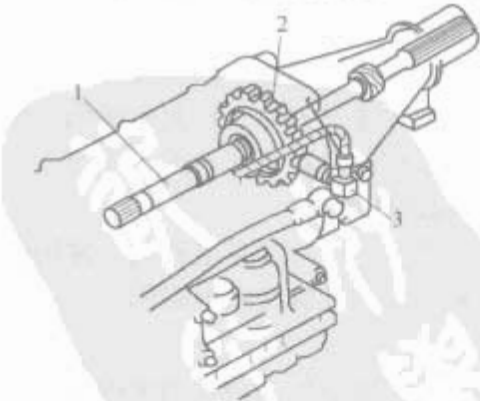


图 1.3-41 车速传感器

1—输出轴；2—停车锁定齿轮；
3—车速传感器

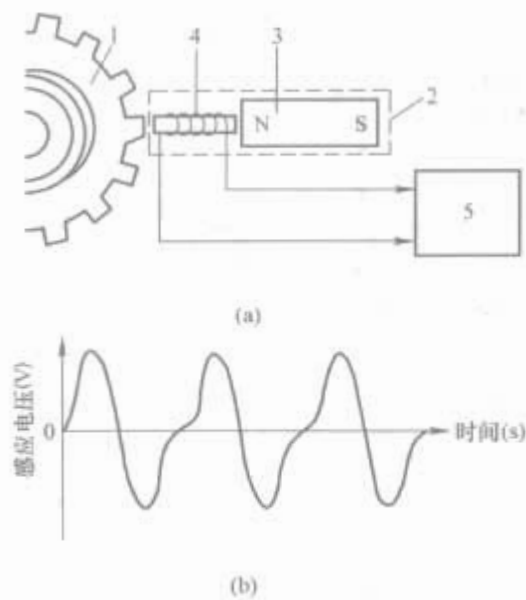


图 1.3-42 车速传感器的工作原理

(a)结构；(b)感应电压曲线

1—停车锁定齿轮；2—车速传感器；3—永久磁铁；
4—感应线圈；5—电控组件

2.4.1.3 输入轴转速传感器

输入轴转速传感器的结构、工作原理与车速传感器基本相同。它安装在行星齿轮变速器输入轴或与输入轴连接的离合器附近的壳体上。输入轴转速传感器用于检测输入轴转速，并把信号输入电控组件，电控组件根据该信号更加精确地控制换挡。另外，电控组件还把该信号与发动机转速信号进行比较，计算出变速器的传动比，使主油路压力控制过程和锁定离合器的控制过程得到优化，以达到改善换挡质量，提高行驶性能的目的。

2.4.1.4 液压油温度传感器

液压油温度传感器安装在自动变速器油底壳内的液压阀体上，它用于检测液压油的温度，电控组件根据液压油温度等信号进行换挡控制、油压控制和锁定离合器控制。液压油温度传感器由负温度系数半导体热敏电阻制成，温度越高，电阻越低。电控组件根据电阻的变化检测出自动变速器液压油的温度。

除了以上的传感器以外，自动变速器的控制系统还将根据发动机控制系统的发动机转速信号、发动机冷却液温度信号、大气压力信号、进气温度信号等作为参考信号控制自动变速器的换挡过程。

自动变速器电子控制开关有 O/D 超速挡开关、模式选择开关、强制降挡开关、空挡起动开关、挡位开关等。其中挡位开关由几个触点组成，当换挡手柄在不同位置时，使相应的触点接通，电控组件根据被接通的触点检测出换挡手柄的位置，并按不同的控制程序控制自动变速器的工作。

2.4.2 各种执行器的结构和工作原理

自动变速器电子控制装置中的执行器是电磁阀。常用的有两种电磁阀：开关式电磁阀和线性脉冲式电磁阀。

2.4.2.1 开关式电磁阀

开关式电磁阀用于开启或关闭液压油路，用于控制换挡阀和变矩器锁定控制阀的工作，实现自动变速器的换挡和变矩器的锁定。

开关式电磁阀由电磁线圈、衔铁、回位弹簧、阀芯和阀球等组成，如图 1.3-43 所示。这种电磁阀有两种工作方式。一种是让某一油路保持油压或泄荷，即当电磁阀断电时，油压推开阀芯，使泄油口打开，该油路的油液经电磁阀泄荷，油路压力为 0；当电磁阀通电时，阀芯下移，使泄油口关闭，油路压力上升。另一种工作方式是开启或关闭某一油

路，也就是当电磁阀线圈不通电时，阀芯被油压推开，阀球在油压作用下关闭泄油口，打开进油口，使主油路压力油进入控制油道；当电磁阀线圈通电时，阀芯下移，推动阀球关闭进油口，同时打开泄油口，使控制油道中的压力油经泄油口泄荷。

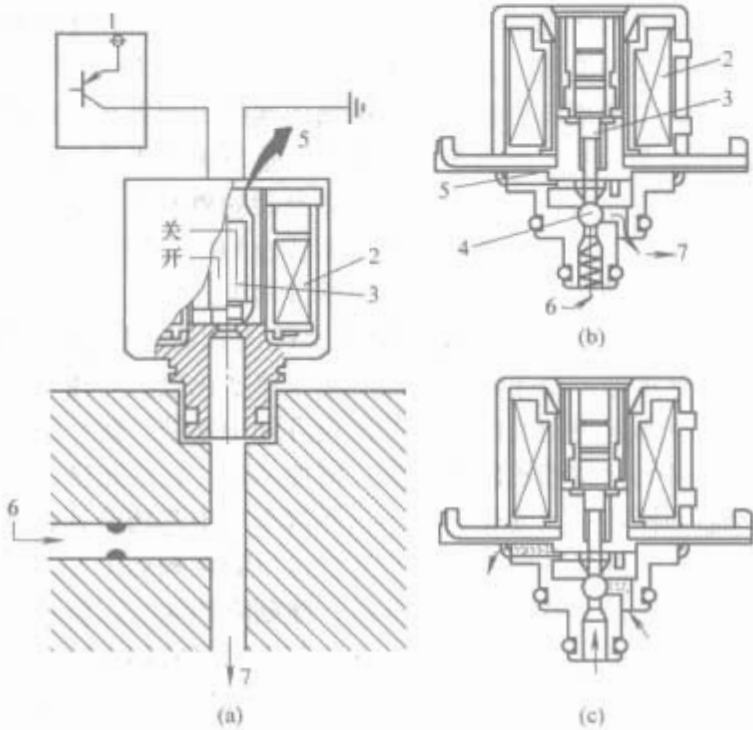


图 1.3-43 开关式电磁阀

(a)保持油压或泄荷；(b)主油路压力油进入控制油道；
(c)控制油道内的压力油泄荷

1—电控组件；2—电磁线圈；3—衔铁和阀芯；
4—阀球；5—泄油口；6—主油道；7—控制油道

2.4.2.2 线性脉冲式电磁阀

线性脉冲式电磁阀也是由电磁线圈、衔铁、阀芯和滑阀等组成，如图 1.3-44 所示。线性脉冲式电磁阀一般用来控制油路中的油压。当电磁阀通电时阀芯或滑阀被打开，油液经泄油口泄荷，使油路压力下降。当电磁阀断电时，阀芯或滑阀在弹簧力的作用下关闭泄油口，使油路压力上升。控制线性脉冲式电磁阀工作的是一个固定频率的脉冲电信号，电磁阀在脉冲电信号的作用下不断地打开或关闭泄油口，电控组件通过改变占空比，即改变每个脉冲周期内电流接通和断开的时间比，改变电磁阀开启和关闭的时间比率，来控制油路压力。占空比越大，通过电磁阀泄掉的油液也越多，油路压力也越低；当占空比越小时，油路压力也越大。线性脉冲式电磁阀一般安装在主油路或减振器背压油路上，电控组件通过线性脉冲电磁阀在自动变速器升挡或降挡的瞬间使油路压力下降，以减少换挡冲击，使挡位的变换更加柔和。

2.4.3 组件及控制电路结构与工作原理

自动变速器电控系统由各种传感器和控制开关、ECT 执行器组成，如图 1.3-45 所示。

2.4.3.1 换挡控制

换挡控制是指自动变速器换挡时刻控制，也就是当汽车行驶速度达到一定车速时，使自动变速器自动升挡或降挡。自动变速器的换挡时刻是指换挡车速、升挡车速或降挡车速，它对汽车的动力性和燃料经济性影响较大。电控自动变速器控制系统能使汽车在任何行驶条件下都能按照最佳时刻进行换挡，从而使汽车的动力性和经济性都能得到很好的发挥。

汽车的最佳换挡车速主要由行驶时节气门开度决定。在不同节气门开度下的最佳换挡车速如图 1.3-46 所示，由图可知，节气门开度越小，升挡车速和降挡车速越低；节气门

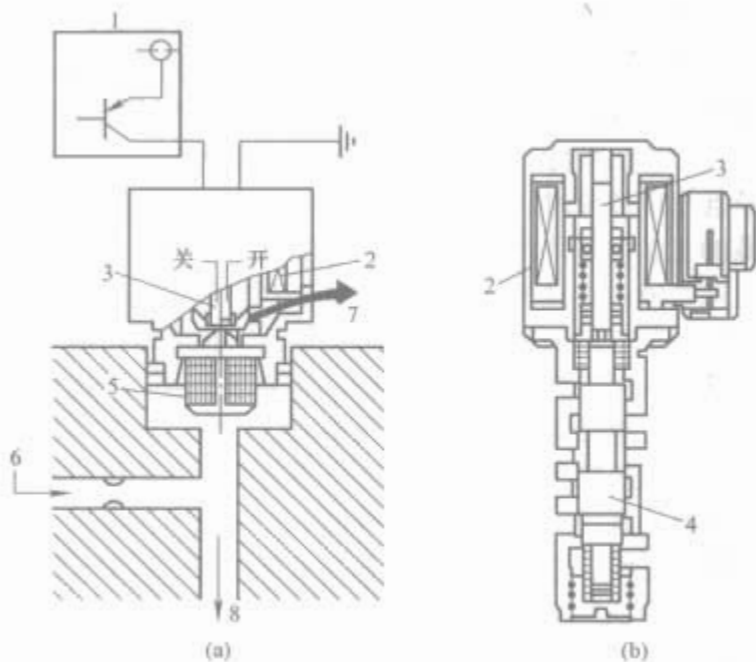


图 1.3-44 线性脉冲式电磁阀

- (a)普通线性脉冲式电磁阀；
(b)带滑阀的线性脉冲式电磁阀
1—电控组件；2—电磁线圈；3—衔铁和阀芯；4—滑阀；
5—滤网；6—主油道；7—泄油口；8—控制油道

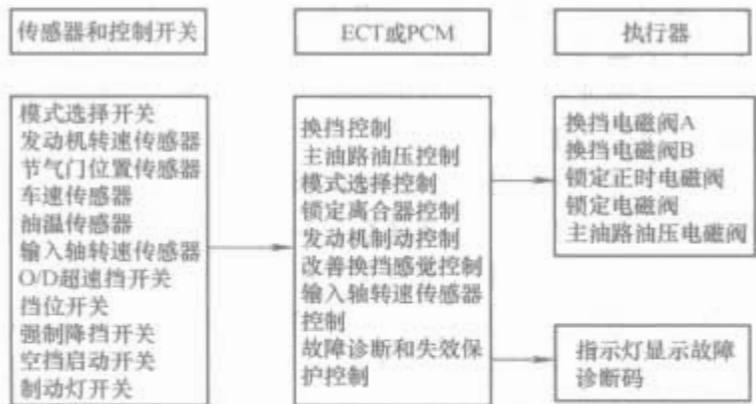


图 1.3-45 自动变速器电控系统的组成

开度越大，升挡车速和降挡车速越高。实践证明，这种换挡规律符合汽车的使用要求。

而当换挡手柄和模式选择开关在不同位置时，电控自动变速器控制系统根据各种开关信号从存储器中选择出自动换挡图，再将节气门位置和车速信号与换挡图比较，在达到换挡车速时电控组件向换挡电磁阀发出指令，实现自动换挡。

2.4.3.2 主油路油压控制

轿车电子控制自动变速器的电液式控制系统已经取消了由节气门拉线控制的节气门阀，主油路油压由一个油压电磁阀控制产生。油压电磁阀是一种线性脉冲式电磁阀，电控组件根据节气门位置传感器测得的节气门开度，计算并控制送往油压电磁阀的脉冲信号占空比，借以改变油压电磁阀泄油口的大小，产生随节气门开度变化的节气门油压。节气门开度越大，脉冲信号占空比越小，油压电磁阀的泄油口开度越小，节气门油压也越大。当这一节气门油压被反馈至主油路调压阀时，它作为主油路调压阀的控制压力，使主油路调压阀随节气门开度的变化改变所调节的主油压的大小，自动变速器获得不同负荷下的主油路油压的最佳值，油泵的泵油损

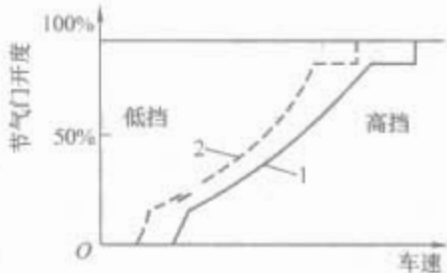


图 1.3-46 自动变速器换挡规律
1—表示汽车加速时的换挡规律；
2—表示汽车减速时的换挡规律

失最小。电控组件还能根据挡位开关信号，在换挡手柄位于倒挡位置时，提高倒挡时的主油路油压，以满足倒挡时使主油路油压升高的要求。主油路油压随节气门开度变化曲线如图 1.3-47 所示。

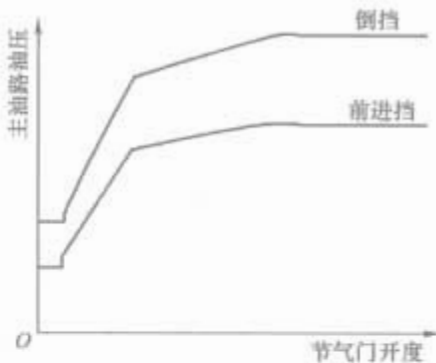


图 1.3-47 主油路油压曲线

电控组件还能根据各个传感器检测得出的自动变速器的工作状况，对主油路油压进行修正，使主油路油压更能适应换挡需要。当换挡手柄在前进低挡位置时，由于汽车的驱动力大，电控组件会使主油路油压高于前进挡时的油压，满足动力传递的需要。在自动变速器换挡过程中，电控组件还能根据节气门开度的大小，通过油压电磁阀适当减小主油路油压，以减小换挡冲击，改善换挡质量。换挡时主油路油压曲线如图 1.3-48 所示。电控组件还能根据液压油温度传感器的信号，在油液温度未达 60℃ 时，把主油路油压调整为低于正常值，防止因油液温度低、黏度大产生换挡冲击。而当油液温度过低时，例如低于 20℃ 时，电控组件使主油路油压升为最大值，用以加快离合器、制动器的接合，防止温度过低时油液黏度大而使换挡过程缓慢。

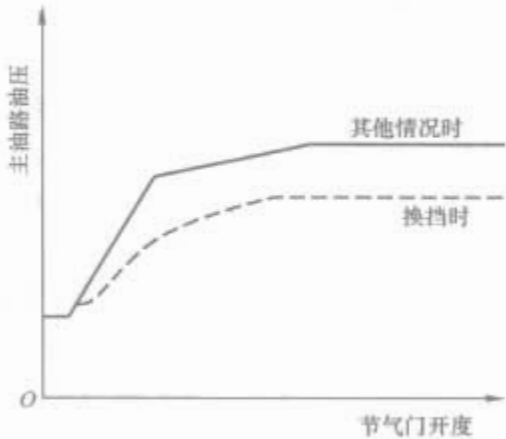


图 1.3-48 换挡时主油路油压曲线

2.4.3.3 自动模式选择控制

自动变速器选择不同的驱动模式可以满足不同的使用要求。在经济模式中，可以在获得良好的燃油经济性的情况下进行换挡，换挡车速较低，动力性能发挥稍差。在动力模式中，可以在发挥较好动力的情况下进行换挡。在标准模式中，可以同时兼顾到动力性和经济性的发挥。新型自动变速器的控制系统由电控组件进行控制，可以取消模式选择开关，由电控组件自动进行模式选择控制。电控组件根据各个传感器检测出的汽车行驶情况和驾驶员的操作方式，经过电控组件运算分析，自动选择采用经济模式、标准模式或动力模式进行挡位的变换，以达到不同的使用要求。电控组件进行自动模式选择控制的依据是换挡手柄的位置和加速踏板踩下的速率，以此判断操作目的，自动选择控制模式。

2.4.3.4 锁定离合器控制

自动变速器锁定离合器的接合和分离是由电控组件操纵锁定电磁阀来完成的。当锁定电磁阀通电时，锁定离合器接合，变矩器的蜗轮和泵轮被接合成一整体，发动机的动力直接传入自动变速器的输入轴，实现直接传动，完成锁定。自动变速器在各种工作条件下，最佳锁定离合器的结合程序已事先储存在电控组件中，即电脑的存储器中。需要锁定的条件是：电控组件根据自动变速器的挡位、控制模式等工作条

件从存储器中选择出相应的锁定程序,再将车速、节气门开度与锁定控制程序进行比较。当车速达到锁定车速时,而其他各种因素均能满足锁定条件时,电控组件即向锁定电磁阀发出锁定信号,使锁定离合器接合,实现变矩器的锁定控制。在一些特殊条件下,电控组件又禁止锁定离合器接合,以保证汽车的行驶性能。当液压温度低于 60℃,车速低于 140km/h,并且怠速开关接通时,电控组件禁止变矩器锁定离合器接合。轿车电控液力式自动变速器使用线性脉冲式锁定电磁阀作为锁定电磁阀。当电控组件控制锁定离合器接合时,通过改变脉冲信号占空比,使锁定电磁阀开度缓慢增大,用以减小锁定离合器接合时产生的冲击,使锁定离合器的接合更加柔和。

2.4.3.5 发动机制动控制

3 行星排辛普森式 4 挡行星齿轮变速器和双行星排辛普森式 4 挡行星齿轮变速器中的 2 挡强制制动器及前进强制离合器的工作是由电控组件操纵电磁阀来控制的。当换挡手柄位置、车速、节气门开度等因素满足一定条件时,例如换挡手柄在前进低挡,并且车速大于 10km/h,节气门开度小于 1/8 时,电控组件向强制离合器电磁阀或强制制动器电磁阀发出电信号,使强制离合器或强制制动器的控制油路打开,使之接合或产生制动,让自动变速器具有反向传递动力的能力,在汽车滑行时产生强有力的发动机制动效能。

2.4.3.6 改善换挡感觉控制

自动变速器改善换挡感觉控制有以下几种方法,即换挡油压控制、减扭矩控制和 N—D 换挡控制。

(1) 换挡油压控制。自动变速器在升挡和降挡的瞬间,电控组件通过油压电磁阀适当降低主油路油压、用以减小换挡冲击,改善换挡感觉。也有的自动变速器的控制系统通过电磁阀在换挡时减小减振器活塞的背压,用以减缓离合器或制动器液压缸内的油压增长速率,来减小换挡时的冲击。

(2) 减扭矩控制。自动变速器换挡的一瞬间,通过推迟发动机点火时间或减少喷油量,减小发动机瞬间输出的扭矩,用以减小换挡冲击和输出轴的扭矩波动。具体减扭矩控制过程是:自动变速器的电控组件在自动变速器升挡或降挡的一瞬间,通过电路向发动机电控组件发出减扭矩控制信号,发动机电控组件在接收到这一信号后,立即推迟发动机的点火时间或减少喷油量,实行减扭矩控制,在完成减扭矩控制后,向自动变速器电控组件发回已减扭矩信号。

(3) N—D 换挡控制。N—D 换挡控制是指换挡手柄由停车挡或空挡(P 或 N)位置换到前进挡或倒挡(D 或 R)位置,或由 D 位或 R 位换到 P 位或 N 位时,通过调整喷油量,把发动机转速变化减小到最小速度,用以改善换挡感觉。

2.4.3.7 输入轴转速传感器控制

自动变速器电控组件根据输入轴转速传感器的电信号,可以检测出输入轴的转速,并以此可以计算出变矩器的泵轮和涡轮的转速比,也就是变矩器的传动比。还可以计算出发动机曲轴和变速器输入轴的转速差,使电控组件更精确地控制自动变速器的换挡和锁定工作。特别是电控组件在进行换挡油压控制、减扭矩控制、锁定离合器控制时,利用这一参数进行计算,可使这些控制更加精确,以获得最佳的换挡质量和乘坐舒适性能。

2.4.3.8 故障诊断和失效保护功能

电控自动变速器的电控装置都具有故障诊断和失效保护功能。在电控组件即电脑内有故障诊断电路,它在汽车行驶过程中不断地监测自动变速器电控装置中各种传感器和执行器的工作状态,一旦发现某个传感器或执行器出现故障,它

会立即采取保护措施。当自动变速器出现故障时,警告灯亮,用以提醒驾驶员停车检修。电脑把检测到的故障以故障码的形式储存在存储器中。在维修中通过仪器或采用白诊断方法可以读出故障,为维修工作带来了很大的方便。当自动变速器出现故障时,电脑会按设定失效保护程序控制自动变速器的工作,保持汽车的基本行驶能力。当节气门位置传感器出现故障,怠速开关断开时,按节气门 1/2 开度控制工作,同时节气门油压为最大值;怠速开关接通时,按节气门全闭状态控制工作,同时节气门油压为最小值。车速传感器出现故障,电控组件不能进行自动换挡控制。这时自动变速器的挡位由换挡手柄的位置决定。设有两个车速传感器的自动变速器,其中一个用于换挡控制,一个用于仪表板上的车速表的传感器。这两个传感器都与电脑连接。当用于换挡的车速传感器损坏时,电脑可利用车速表传感器的信号控制换挡。

输入轴转速传感器出现故障时,电控组件停止减扭控制,这时换挡冲击较大,液压油温度传感器出现故障,电控组件按 80℃ 油温控制工作。

当执行器如电磁阀出现故障时,保护措施有两种:①不论有几个电磁阀出现故障,电控组件停止所有换挡电磁阀的工作,自动变速器的挡位完全由换挡手柄的位置决定;②如果有一个电磁阀出现故障,电控组件控制其他无故障电磁阀继续工作,保证自动变速器能自动升挡或降挡,但会失掉某些挡位,使换挡规律有变化。

当强制离合器或强制降挡电磁阀出现故障时,电控组件会停止电磁阀的工作,让强制离合器或强制降挡电磁阀始终保持接合,当汽车减速时总有发动机制动作用存在。

锁定电磁阀出现故障,电控组件停止锁定离合器控制,使锁定离合器始终处于分离状态。当油压电磁阀出现故障时,电控组件停止锁定离合器控制,这时油路压力保持最大。

3 汽车悬架控制系统

3.1 悬架的作用

悬架控制系统就是指由车身与轮胎间的弹簧和避震器组成整个支持系统,它的主要任务是传递作用在车轮和车架之间的一切力和力矩,并且缓和由不平路面传给车架的冲击负荷,衰减由此引起的承载系统的振动,保证汽车的平稳行驶。

3.1.1 悬架基本组成

汽车的悬架虽有不同的结构形式,但一般都是由弹性元件、减振器和导向机构三部分组成,如图 1.3-49 所示。

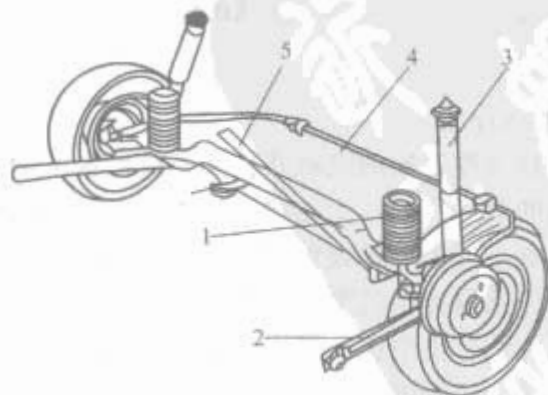


图 1.3-49 汽车悬架的组成示意图

1—弹性元件; 2—纵向推力杆; 3—减振器;
4—横向稳定器; 5—横向推力杆

因为汽车行驶的路面不可能全是平坦的,路面作用于车轮上的垂直反力往往是冲击性的,尤其是在坏路面上高速行驶时,这种冲击力将达到

很大的数值。为了缓和冲击,在汽车行驶中,除了采用弹性

的充气轮胎之外，在悬架中还装有弹性组件，使车架(或车身)与车桥(或车轮)之间作弹性联系。但弹性系统在受到冲击后，将产生振动。由于持续的振动易使乘员感到不舒适和疲劳，因此悬架还应当具有减振作用，使振动迅速衰减(振幅迅速减小)。为此，在许多结构形式的汽车悬架中都设有专门的减振器。弹性元件、减振器和轮胎的综合特性，决定了汽车的行驶性、操纵性和乘坐的舒适性；由于弹性元件、减振器均是决定刚度的元件，它们对路面状况和汽车的行驶状况(如汽车直线行驶时的加速和制动，汽车转弯)的适应性均受到了很大的局限。而且汽车的乘坐舒适性和操纵性是一对矛盾的两方面。如果要保证汽车的乘坐舒适性，就要求悬架比较柔和；要保证汽车的操纵稳定性，就要求悬架具有较大的弹簧刚度和阻尼力较大的减振器。如果这两方面任意地加强一面，均会使另一方面受到较大的影响。因此在汽车设计时，为了对它们进行兼顾，只能采用折衷措施，根据汽车的行驶状况、道路状况、悬架结构等进行最优化设计，如改进悬架的结构和有关参数。

车轮相对于车架和车身跳动时，车轮的运动轨迹应符合一定的要求，否则，对汽车某些行驶性能有不利的影响，特别是操纵稳定性。所以悬架中某些传力构件同时还承担着使车轮按一定轨迹相对于车架和车身跳动的任务，因而这些传力构件还起导向作用，故称导向机构。

3.1.2 悬架种类

汽车悬架根据导向机构的不同可分为非独立悬架和独立悬架，如图 1.3-50 所示。

非独立悬架[见图 1.3-50(a)]的结构特点是：两侧车轮安装在一根整体式的车桥上，车轮连同车桥一起通过弹性悬架悬挂在车架(或车身)下面。当右侧车轮因路面不平等原因相对于车架(或车身)的位置发生变化时，左侧车轮的位置也随之发生变化。

独立悬架[见图 1.3-50(b)]的结构特点是：采用断开式的车桥，两侧车轮分别独立地通过弹性悬架悬挂在车架(或车身)下面。这样，当一例车轮相对于车架(或车身)的位置发生变化时，另一例车轮并不会受影响。由于车桥是断开式的，可降低发动机的安装位置、汽车重心，并使结构紧凑；且允许前轮有较大的跳动，便于选择较软的弹性元件，以改善行驶平顺性。

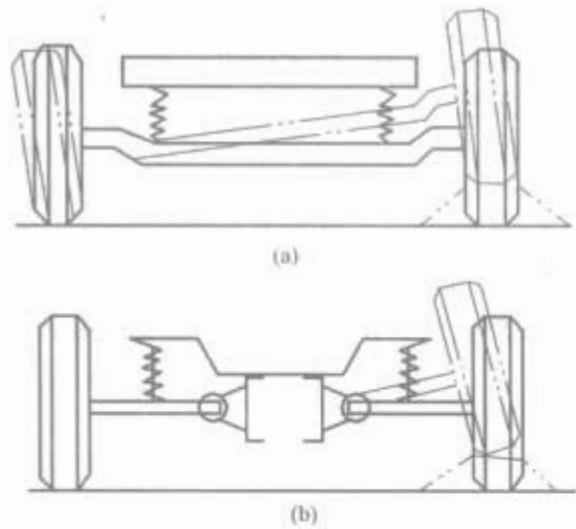


图 1.3-50 非独立悬架与独立悬架示意图
(a)非独立悬架；(b)独立悬架

汽车悬架根据控制系统有源无源可以分为主动悬架和半主动悬架。

所谓主动悬架就是根据汽车的运动状态和路面状况，主动调节悬架系统的刚度、减振器阻尼系数、车身高度和姿

态，使悬架处于最佳的减振状态。这种主动悬架调节消耗能量，需要动力源提供能源。

如图 1.3-51 所示，传感器检测出汽车的行驶状态并反馈至悬架控制模块 ECU，ECU 综合这些反馈信息计算并输出指令给执行机构——主动力发生器，从而使电控悬架随行驶及路面状态不同而变化。

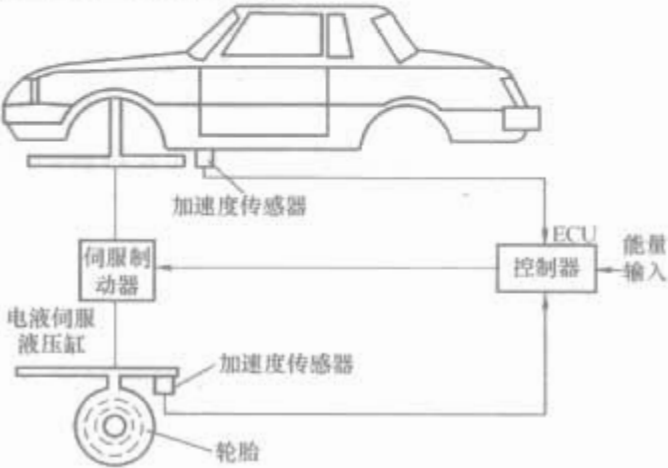


图 1.3-51 主动悬架

半主动悬架只能对减振器的阻尼力进行调解，它是无源的，一般以车身振动加速度为控制目标参数，通过控制步进电动机来驱动阻尼减振器中的元件，调解阻尼值，从而实现对减振器阻尼力的控制。在半主动悬架的 ECU 中，预先设定了一个目标控制参数 μ ，它是以汽车行驶平顺性最优控制为目的设计的。它可根据路面的激励和车身的响应，对悬架的阻尼进行自适应调整，使车身振动被控制在一定的范围之内。但汽车在转向、起步、制动等工况不能对刚度和阻尼进行有效控制，也不能对车身高度进行控制。

3.2 减振器阻尼力控制

3.2.1 减振器的作用

为了使汽车在行驶中所受到的由冲击力引起的车架和车身的振动迅速衰减，以改善汽车的行驶平顺性，在大多数汽车的悬架系统中都有与弹性组件并联安装的减振器，其安装



图 1.3-52 减振器与弹性元件的安装示意图
1—车架；2—减振器；
3—弹性元件

如图 1.3-52 所示。

汽车悬架系统中广泛采用液力减振器，其基本工作原理是利用液体流动的摩擦阻力来消耗冲击振动的能量。当车架与车桥作往复相对运动(车架在弹性组件上振动)时，减振器内的油液反复地从一个内腔通过一些窄小的孔隙流入另一个内腔。此时，孔隙与油液间的摩擦以及油液分子间的内摩擦便形成了对车架振动的阻尼力，从而使车架、车身的振动能量转化

为热能，并被油液和减振器壳体所吸收，然后散发到大气中。减振器阻尼力的大小随车架与车桥(或车轮)的相对速度的增减而增减，并且与油液黏度有关。要求减振器所用油液的黏度受温度变化的影响尽可能小，且具有抗汽化、抗氧化以及对各种金属和非金属零件不起腐蚀作用等性能。

减振器的阻尼力越大，振动衰减得越快，但却使并联的弹性组件的作用不能充分发挥。另外，过大的阻尼力还可能导致减振器连接件及车架损坏。为解决弹性组件与减振器之间的这一矛盾，对减振器提出如下要求：

(1) 在悬架压缩行程(车桥与车架相互移近的行程)内,减振器阻尼力应较小,以便充分利用弹性组件的弹性,以缓冲冲击。

(2) 在悬架伸张行程(车桥与车架相对远离的行程)内,减振器的阻尼力应大,以求迅速减振。

(3) 当车桥(或车轮)与车架的相对速度过大时,减振器应当能自动加大液流通道截面积,使阻尼力始终保持在一定限度之内,以避免承受过大的冲击载荷。

在压缩和伸张两行程内均能起减振作用的减振器称为双向作用式减振器。另有一种减振器仅在伸张行程内起作用,称为单向作用式减振器。汽车上广泛采用双向作用筒式减振器。

3.2.2 双向作用筒式减振器

双向作用筒式减振器一般都具有压缩阀 6、伸张阀 4、

流通阀 8 和补偿阀 7 四个阀,其工作原理如图 1.3-53 所示,流通阀和补偿阀一般为单向阀,弹簧都很软,当阀上的油压作用力与弹簧力同向时,阀门完全闭合;而当油压作用力与弹簧力反向时,较小的油压即可打开阀门。压缩阀 6 和伸张阀 4 是卸载阀,弹簧都较硬,预紧力较大,只有当油压增大到一定程度时,阀门才能开启;只要油压降低到一定程度时,阀门即自行关闭。

双向作用筒式减振器的工作原理可用压缩和伸张两个行程加以说明:

(1) 压缩行程。当车桥移近车架(或车身)时,减振器受压缩,活塞 3 下移,使其下方腔室(下腔)容积减小,油压升高。具有一定压力的油液顶开流通阀 8 进入活塞上方腔室(上腔)。由于活塞杆 1 占去上腔的部分空间,上腔内增加的容积小于下腔减小的容积,因此还有一部分油液不能进入上腔室,而只能推开压缩阀 6,流回到储油缸 5 中。油液流经上述阀时,受到一定的节流阻力,从而形成对悬架压缩运动的阻尼力。压缩行程中的阻尼力应设计成随活塞运动速度的变化而变化。例如,当车架或车身振动缓慢(活塞快速下移)时,油压不足以克服压缩阀弹簧的预紧力而推开阀门,此时,多余的油液经过一些常通的缝架流回到储油缸。当车身剧烈振动时,活塞下腔室油压骤增,压缩阀 6 的开度增大,油液能迅速通过较大的通道流回储油缸 5。这样,油压和阻尼力都不致过大,使压缩行程中弹性元件的缓冲作用得以充分发挥。

(2) 伸张行程。当车桥相对远离车架(或车身)时,减振器受拉伸,活塞 3 上移,使其上腔油压升高。上腔的油液使推开伸张阀 4 流入下腔。同样由于活塞杆 1 的存在,上腔减小的容积小于下腔增加的容积,因而从上腔流来的油液不足以充满下腔所增加的容积,使下腔室内产生一定的真空度,这时储油缸 5 中的油液在真空度作用下推开补偿阀 7 流进下腔室进行补充。此时,这些阀的节流作用即形成对悬架伸张

运动的阻尼力。伸张行程中的阻尼力也应该设计成随活塞运动速度的变化而变化。例如,当车身振动剧烈(即活塞快速上移)时,活塞上腔油压骤增,伸张阀的开度增大,使油压和阻尼力保持在一定的限度范围内。这样,可使减振器及悬架系统的零件不会因超载而损坏。

由于伸张阀 4 弹簧的刚度和预紧力比压缩阀 6 的大,而且伸张行程时油液的通道截面也比压缩行程时小,所以减振器在伸张行程产生的阻尼力比压缩行程内产生的阻尼力大得多。

3.2.3 充气式减振器

图 1.3-54 所示为充气式减振器。其结构特点是:在缸筒的下部装有一个浮动活塞 2,在浮动活塞与缸筒一端所形成的密闭气室 1 中充有高压(2~3MPa)的氮气。在浮动活塞

的上面是减振器油液,O 形密封圈 3 把油和气完全分开,故此活塞也叫封气活塞。在工作活塞 7 上装有压缩阀 4 和伸张阀 8。这两个阀都是由一组厚度相同、直径不等、由大到小而排列的弹簧钢片组成。当车轮上下跳动时,工作活塞在油液中作往复运动,使工作活塞的上、下腔之间产生油压差,压力油便推开压缩阀或伸张阀而来回流动。由于阀对压力油产生较大的阻尼力,使振动衰减。

由于活塞杆的进出面引起的缸筒容积的变化,则由浮动活塞的上下运动来补偿,不需要另设储液缸,故也称为单筒式减振器。充气式减振器与双向作用筒式减振器相比具有以下优点:结构大为简化,零件数约减少 15%;由于减振器内充有高压气体,能有效地减少车轮受到突然冲击时产生的高频振动,且有助于消除噪声,能改善汽车的行驶平顺性和轮胎的接地性;在同样泄流的不利工作条件下,充气式减振器比双筒式减振器能更可靠地保证产生足够的阻尼力;由于内部具有高压气体和油气被浮动活塞隔开,消除了油的乳化现象。充气式减振器也存在以下缺点:对油封性能要求高;充气工艺复杂,不能修理;当缸筒受到外界物体的冲击而变形时,减振器就不能工作。

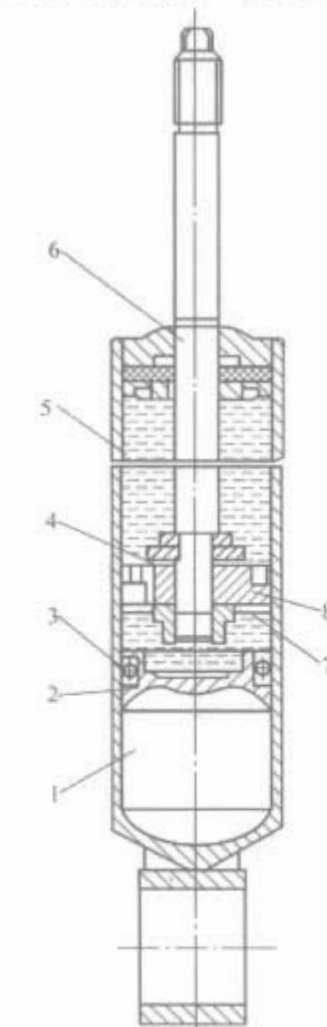


图 1.3-54 充气式减振器

- 1—密封气室; 2—浮动活塞; 3—O 形密封圈; 4—压缩阀; 5—工作缸; 6—活塞杆; 7—工作活塞; 8—伸张阀

3.2.4 阻力可调式减振器

图 1.3-55 所示为阻力可调式减振器。它一般用在高级轿车上。装有这种减振器的悬架系统采用了刚度可变的空气弹簧。其工作原理是:当汽车的载荷增加时,空气囊中的气压升高,气室 2 内的气压随着升高,膜片向下移动与弹簧 3 产生的压力相平衡。与此同时,膜片带动与它相连的柱塞杆 4 和柱塞 5 下移,因而使得柱塞相对空心连杆 1 上的节流孔 6 的位置发生变化,结果减小了节流孔的通道截面积,也就是减少了油液流经节流孔的流量,从而增加了油液流动阻力。而当汽车载荷减小时,柱塞上移,增大节流孔的通道截

图 1.3-53 双向作用筒式减振器示意图

- 1—活塞杆; 2—工作缸; 3—活塞; 4—伸张阀; 5—储油缸; 6—压缩阀; 7—补偿阀; 8—流通阀; 9—导向座; 10—防尘罩; 11—油封

面积,结果减小了油液的流动阻力,因此,满足了汽车随载荷变化而改变减振器阻力的要求。

3.3 非独立悬架与独立悬架

非独立悬架结构简单,工作可靠,广泛应用于货车的前、后悬架。在轿车中,非独立悬架仅用于后桥。悬架的结构,特别是导向机构的结构,因采用的弹性组件不同而有差异,而且有时差别很大。采用螺旋弹簧、油气弹簧时需要较复杂的导向机构。由于钢板弹簧本身可以兼起导向机构的作用,并有一定的减振作用,这就使得悬架结构大为简化。因此,在非独立悬架中,大多数采用钢板弹簧作为弹性组件。

3.3.1 钢板弹簧式非独立悬架

非独立悬架采用钢板弹簧作为弹性组件,通常是将钢板弹簧纵向布置,因此也称为纵置板簧式非独立悬架。图 1.3-56 所示为解放 CA1092 型汽车的前悬架。钢板弹簧中部用 U 形螺栓固定在前桥上钢板弹簧的前端卷耳用钢板弹簧销与前支架相连,形成固定式铰链支点,起传力和导向作用;而后端卷耳则用吊耳销与可在车架上摆动的吊耳相连,形成摆动式铰链支点,从而保证了弹簧变形时两卷耳中心线间的距离有改变的可能。钢板弹簧销钻有轴向和径向油道,通过油嘴将润滑脂注入至衬套处进行润滑,可以延长弹簧的使用寿命。减振器的上、下两个吊环通过橡胶衬套和连接销分别与车架上的上支架和车桥上的下支架相连接。盖板上装有橡胶缓冲块,以限制弹簧的最大变形,并防止弹簧直接碰撞车架。

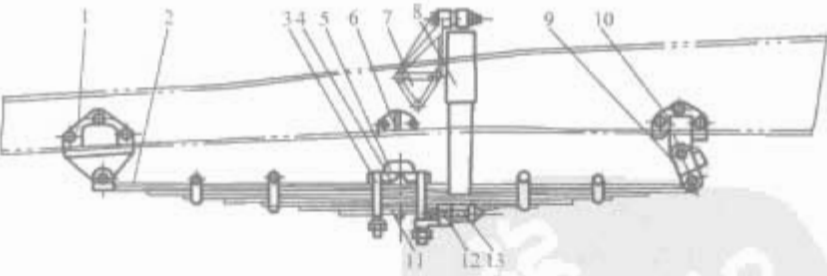


图 1.3-56 解放 CA1092 型汽车的前悬架

- 1—钢板弹簧前支架; 2—前钢板弹簧; 3—U 形螺栓;
4—盖板; 5—缓冲块; 6—限位块; 7—减振器上支架;
8—减振器; 9—吊耳; 10—吊耳支架; 11—中心螺栓;
12—减振器下支架; 13—减振器连接销

3.3.2 螺旋弹簧非独立悬架

图 1.3-57 所示为典型的螺旋弹簧非独立后悬架。螺旋弹簧非独立悬架一般只用作轿车的后悬架。螺旋弹簧上端装在车身上的支座中,下端装在纵向下推力杆上。由于螺旋弹簧只能承受垂直载荷,所以必须设置导向装置来承受并传递纵向力和横向力。导向装置包括纵向推力杆和横向导杆。两根纵向下推力杆和两根纵向上推力杆的一端均与车身相铰

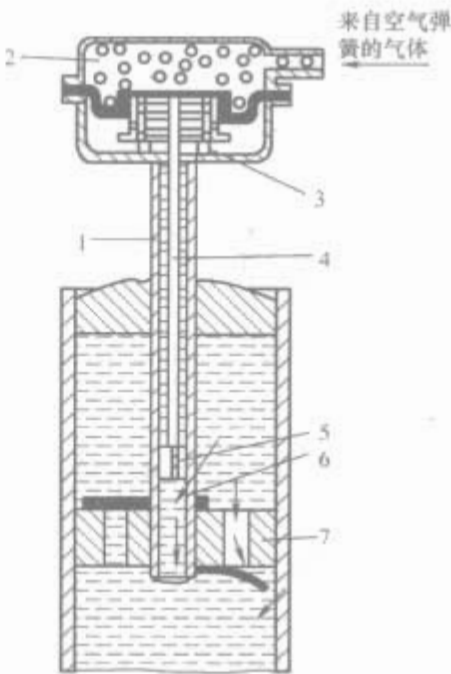


图 1.3-55 阻力可调式减振器

- 1—空心连杆; 2—气室; 3—弹簧;
4—柱塞杆; 5—柱塞; 6—节流孔;
7—活塞

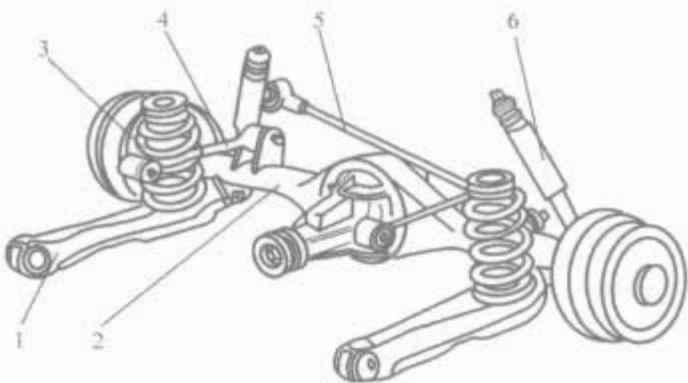


图 1.3-57 螺旋弹簧非独立悬架结构示意图

- 1—纵向下推力杆; 2—后桥; 3—螺旋弹簧;
4—纵向上推力杆; 5—横向导杆; 6—减振器

接,另一端则均与后桥相铰接。纵向上、下推力杆用以传递牵引力、制动力等纵向力及其力矩。当车轮因路面不平上下跳动而致使后桥与车身之间的距离发生变化时,纵向上、下推力杆可绕其与车身的铰支点作上、下纵向摆动,以控制后桥的运动规律。横向导杆的一端与车身铰接,另一端与后桥铰接。横向导杆用以传递悬架系统的横向力。当后桥与车身间的距离发生变化时,横向导杆也可绕其铰支点作上、下横向摆动。在这一过程中,为不致使车身与后桥在横向产生过大的相对位移,要求横向导杆与后桥之间的空间夹角尽可能小,使横向导杆与后桥尽可能保持平行。两个减振器的上端铰接在车身支架上,下端铰接在车桥的支架上。

3.3.3 空气弹簧非独立悬架

图 1.3-58 所示为空气弹簧非独立悬架示意图。囊式空气弹簧 5 的上下端分别固定在车架和车桥上。从压缩机 1 产生的压缩空气经油水分离器 10 和压力调节器 9 进入储气筒 8。压力调节器使储气筒中的压缩空气保持一定的压力。储气筒 6 通过管路与两个空气弹簧相通。储气筒和空气弹簧中的空气压力由车身高度控制阀 3 控制。空气弹簧和螺旋弹簧一样只能传递垂直力,其纵向力和横向力及其力矩也是由纵向推力杆和横向推力杆来传递。采用空气弹簧悬架时,可以通过车身高度控制阀来改变空气弹簧内的空气压力,从而自动调节车身高度,以保证车身高度不因载荷变化而变化。空气弹簧非独立悬架多用于重型车和高级轿车中。

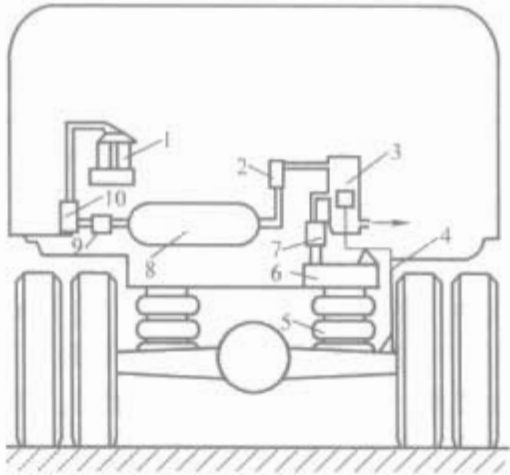


图 1.3-58 空气弹簧非独立悬架示意图

- 1—压缩机; 2, 7—空气滤清器; 3—车身高度控制阀;
4—控制杆; 5—空气弹簧; 6—储气筒; 8—储气筒;
9—压力调节器; 10—油水分离器

为了满足汽车行驶平顺性和操纵稳定性的要求,独立悬架被广泛应用。由于独立悬架能使两侧车轮各自独立地与车架或车身弹性连接,因而具有以下优点:

(1) 在悬架弹性组件一定的变形范围内,两侧车轮可以单独运动而互不影响,在不平道路上行驶时可减少车架和车

身的振动,有助于消除转向轮不断偏摆。

(2) 减少了汽车的非承载质量。在非独立悬架的情况下,整个车桥和车轮都属于非承载质量部分。在用独立悬架时,对驱动桥而言,由于主减速器、差速器及其外壳都固定在车架上,成了承载质量;对转向桥而言,它仅具有转向主销和转向节,而中部的整体梁不再存在。所以在采用独立悬架时,非承载质量只包括车轮质量和悬架系统中一部分零件的全部或部分质量,显然比用非独立悬架时的非承载质量要小得多。在道路条件和车速相同时,非承载质量越小,则悬架所受到的冲击载荷也越小。因此采用独立悬架可以提高汽车的平均行驶速度。

(3) 采用断开式车桥,发动机总成的位置便可以降低和前移,使汽车重心下降,提高了汽车行驶稳定性。同时能给予车轮较大的上下运动的空间,因而可以将悬架刚度设计得较小,降低车身振动频率,以改善行驶平顺性。

但是,独立悬架结构复杂,制造成本高;保养维修不便;在一般情况下,车轮跳动时,由于车轮倾角与轮距变化较大,轮胎磨损较严重。独立悬架的结构类型很多,主要可按车轮运动形式分成以下三类,如图 1.3-59 所示。

(1) 车轮在汽车横向平面内摆动的悬架,称为横臂式独立悬架[见图 1.3-59(a)]。

(2) 车轮在汽车纵向平面内摆动的悬架,称为纵臂式独立悬架[见图 1.3-59(b)]。

(3) 车轮沿主销移动的悬架,包括烛式悬架[见图 1.3-59(c)]和麦弗逊式悬架[见图 1.3-59(d)]。

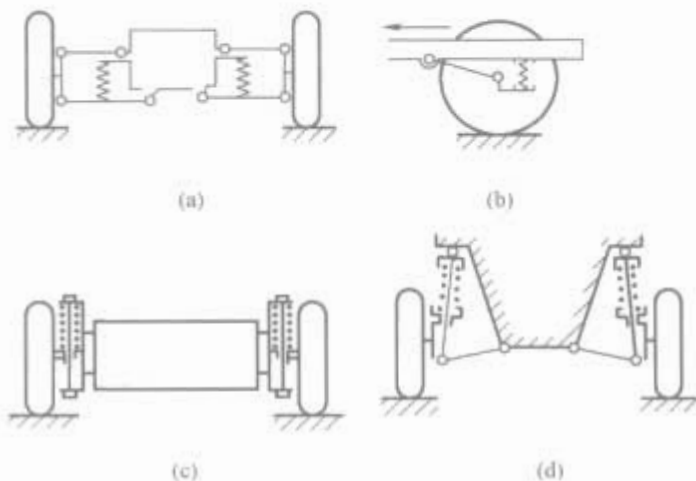


图 1.3-59 四种基本类型的独立悬架示意图
(a)横臂式独立悬架;(b)纵臂式独立悬架;
(c)烛式悬架;(d)麦弗逊式悬架

3.3.4 横臂式独立悬架

横臂式独立悬架分为单横臂式和双横臂式两种。

单横臂式独立悬架当悬架变形时,车轮平面将产生倾斜而改变两侧车轮与路面接触点间的距离(轮距),致使轮胎相对于地面侧向滑移,破坏轮胎和地面的附着。此外,若这种悬架用于转向轮,会使主销内倾角和车轮外倾角发生较大的变化,对于转向操纵有一定影响,故这种结构应用较少。

双横臂式独立悬架的两个摆臂长度可以相等,也可不等,如图 1.3-60 所示。图 1.3-60(a)所示为两摆臂等长的悬架,当车轮上下跳动时,车轮平面没有倾斜,但轮距却发生了很大的变化,这就增加了车轮侧向滑移的可能性。在图 1.3-60(b)所示的摆臂不等长的独立悬架中,若将两臂长度选择适当,可以使车轮和主销的角度以及轮矩的变化都不大,这样的轮距变化可以由较软的轮胎变形来适应。轿车的轮胎可容许轮距的改变在每个车轮上达到 4~5mm 而不致使车轮沿路面滑移,故这种独立悬架在轿车的前轮上应用得较

广泛。

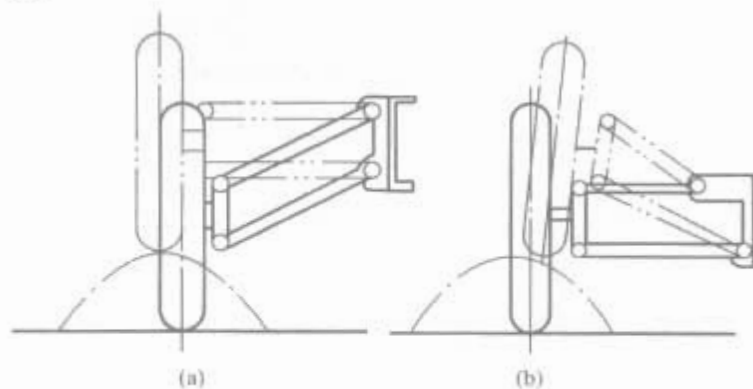


图 1.3-60 双横臂式独立悬架示意图
(a)摆臂等长的独立悬架;(b)摆臂不等长的独立悬架

3.3.5 纵臂式独立悬架

纵臂式独立悬架有单纵臂和双纵臂两种。

转向轮采用单纵臂独立悬架,车轮上下跳动将使主销后倾角产生很大变化。因此,单纵臂式独立悬架一般多用于不转向的后轮。

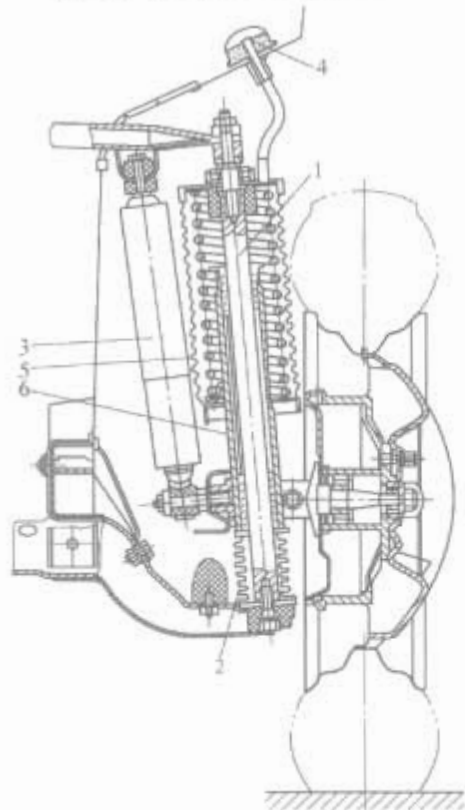


图 1.3-61 烛式悬架
1—主销;2,4—防尘器;3—套筒;
5—减振器;6—通气筒

双纵臂独立悬架的两个纵臂长度一般做成相等,形成平行四连杆机构。这样,当车轮上下跳动时,车轮外倾角、轮距和主销后倾角保持不变,故这种形式的悬架适用于转向轮。

3.3.6 烛式悬架

图 1.3-61 所示为车轮沿固定不动的主销轴线上移动的烛式独立悬架。对于转向轮来说,当悬架变形时,主销的定位角不会发生变化,仅轮距、轴距稍有改变,故有利于汽车的转向操纵和行驶稳定性。但是,侧向力全部由套在主销上的长套筒和主销承受,因此套筒与主销之间的摩擦阻力大,磨损严重。

3.3.7 麦弗逊式悬架

图 1.3-62 所示为上海桑塔纳轿车的前悬架支柱组成。它所采用的是麦弗逊式独立悬架,主要由双向筒式减振器、螺旋弹簧及轮毂轴承壳组成。减振器活塞杆的上端通过止推轴承及支撑套等与车身挠性连接,减振器套筒通过固定螺栓固定在轮毂轴承壳的承孔中。螺旋弹簧,套装在减振器支柱上,其下端压在轮毂轴承壳上的下弹簧座上,上端通过弹簧座及止推轴承等支撑于车身上。轮毂轴承壳通过下摆臂与前悬架相接,并通过安装在其下端承孔中的轮毂轴承实现对轮毂的支撑。轮毂轴承壳中部的转向节臂与轮毂轴承壳制成一体,并通过球头与转向横拉杆相连。转动转向盘时,转向横拉杆便推动轮毂轴承壳及轮毂、车轮等一起转动,实现汽车的转向。路面不平时,减振弹簧的伸缩及减振器活塞杆与减振器套筒的相对轴向运动,实现了车辆的缓冲与减振。活塞杆下行的行程由橡胶限位缓冲块限制。这种悬架的优点是整体结构简单,增大了前轮内侧的空间,便于发动机及其他机

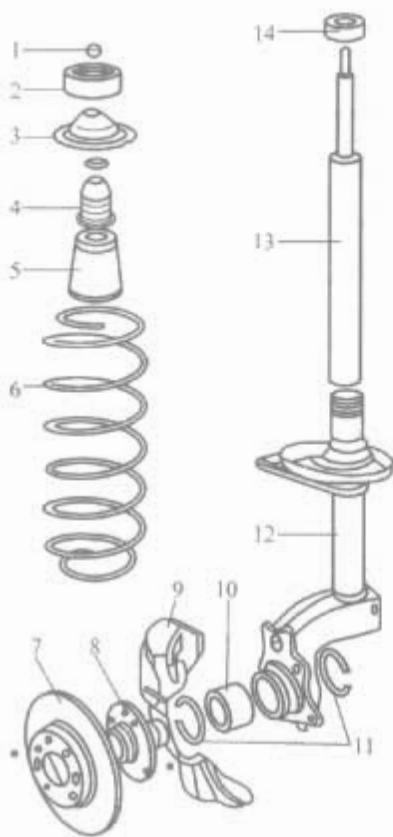


图 1.3-62 桑塔纳轿车前悬架支柱组成

1—自锁螺母；2—悬架上支架；3—上弹簧座；4—限位缓冲块；5—橡胶护套；6—螺旋弹簧；7—制动盘；8—轮毂；9—挡泥板；10—轮毂轴承；11—弹簧挡圈；12—轮毂轴承壳；13—减振器；14—固定螺栓

件的布置，维修方便，并具有行驶平稳、转弯半径小、接地性及操纵稳定好等特点。车轮与车身之间由螺旋弹簧、减振器及下摆臂等传力，分散了悬架的受力点，使每个受力点（支撑点）上所承受的载荷相对减小，但其隔音较为困难。

3.4 主动悬架

为了有效地抑制路面不平所引起的车体振动，保证乘坐舒适性，要求悬架要“软”；为了减小汽车转向、制动及加速时车体的侧倾和俯仰，提高汽车的操纵稳定性，则又要求悬架较“硬”；在低速行驶以及在好路面行驶时要求悬架要“软”，在高速或不平路面行驶时要求悬架要“硬”，即在汽车行驶过程中，要求悬架系统能根据实际需要随时调节悬架的刚度和阻尼力，以达到最佳的行驶平顺性和操纵稳定性。

在高级轿车上采用电子控制的悬架系统。

电子控制悬架分为主动悬架和半主动悬架两大类。所谓主动悬架，就是根据车辆的运动状态和路面情况，主动调节悬架系统刚度、减振器阻尼系数、车身高度和姿态，使悬架始终处于最佳的减振状态。这种调节要消耗能量，需要有动力源提供能源，即系统是有源的。通常采用闭环电子控制系统对主动悬架进行控制和调节根据悬架使用的介质不同，又可分为油气式主动悬架和空气式主动悬架两种。我国进口汽车使用较多的为空气式主动悬架。

电子控制悬架系统由传感器、ECU、调节悬架的执行机构三部分组成。

(1) 传感器。传感器将汽车行驶的车速、起动、加速、转向、制动和路面状况(汽车的振动)等转变为电信号，输送给ECU，主要有车身加速度传感器、车身高度传感器、车速传感器、方向盘转角传感器、节气门位置传感器、车门传感器等。

(2) ECU。它将传感器输入的电信号进行综合处理，输出对悬架的刚度、阻尼及车身高度进行调节的控制信号。

(3) 调节悬架的执行机构。调节悬架参数的执行机构按照ECU的控制信号，准确及时地动作，调节悬架的刚度、阻尼系数及车身的高度。通常所用的执行元件是电磁阀和步进电动机及气泵电动机等。

3.4.1 空气式主动悬架

电子控制主动空气悬架系统的配置如图 1.3-63 所示。它由一组传感器、ECU、空气悬架、车高控制装置等组成。主动空气悬架系统根据车身高度、车速、转向和制动等传感器信号，由ECU经过运算分析后输出控制信号，控制电磁式或步进电动机执行器，及时改变悬架的刚度、阻尼系数和车身高度，以适应各种复杂的行驶工况对悬架特性的不同要

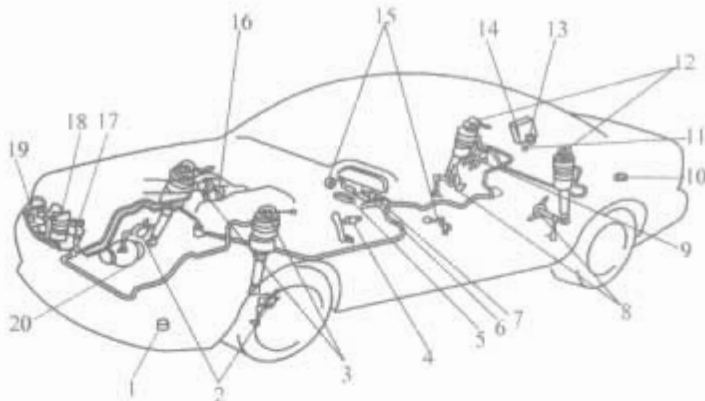


图 1.3-63 电子控制主动空气悬架系统的配置图

1—1号高度控制继电器；2—车身高度传感器；3—前悬架控制执行器；4—高度控制开关；5—转向传感器；6—高度控制开关；7—LRC开关；8—后车身位移传感器；9—2号高度控制阀和溢流阀；10—高度控制开关；11—高度控制连接器；12—后悬架控制执行器；13—2号高度控制继电器；14—悬架电脑；15—门控灯开关；16—主节气门位置传感器；17—1号高度控制阀；18—高度控制压缩机；19—干燥器和排气阀；20—IG调解器

求，保证汽车行驶过程中的操纵稳定性和乘坐舒适性。高度控制阀按照ECU的控制信号完成开闭动作，改变空气悬架的充气量，实现车身高度调节。调压器使气泵输出的压缩空气压力保持稳定。

3.4.1.1 空气式主动悬架的控制功能

主动悬架系统中，悬架的刚度与阻尼有“软”和“硬”两种控制模式，每种模式下按刚度与阻尼的大小依次有低、中、高三种状态。“软”或“硬”控制模式可以用手扳动选择开关决定，有的悬架控制系统则是由计算机来决定。模式一经确定，就由ECU在低、中、高三种状态间自动调节刚度和阻尼系数。主动悬架系统主要对车速及路面感应、车身姿态、车身高度三个方面进行控制。

(1) 车速与路面感应控制。车速是汽车悬架系统常用的控制信号，而汽车车身的侧倾程度取决于汽车的车速和转向半径的大小。通过对车速的检测，来调节电控悬架的阻尼力，从而改善汽车行驶的安全性。车速很高时，控制器输出控制信号，使悬架的刚度和阻尼相应增大，以提高汽车高速行驶时的操纵稳定性；当汽车前轮在遇到路面接缝等单个的突起时，控制器输出控制信号，相应减小后轮悬架的刚度和阻尼，以减小车身的振动和冲击；当汽车进入差路面行驶时，为抑制车身产生大的振动，控制器输出控制信号，相应增大悬架的刚度和阻尼。

常用的车速传感器的类型有舌簧开关式车速传感器、磁阻元件式车速传感器、磁脉冲式车速传感器和光电式车速传感器。一般情况下，舌簧开关式和光电式车速传感器安装在汽车仪表板上，与车速表装在一起，并用软轴与变速器的输出轴相连；而磁阻元件式和磁脉冲式车速传感器装在变速器上，通过蜗杆蜗轮机构与变速器的输出轴连动。

(2) 车身姿态控制。车身姿态控制是从驾驶人员的操作中预测车身姿态的变化趋势，对悬架的刚度和阻尼实施控制，ECU以抑制车身的过度摆动，从而确保车辆乘坐舒适性和操纵稳定性。

① 转向时车身侧倾控制。当驾驶员急打方向盘使汽车急转弯时，转向传感器将方向盘的转角和转速电信号输入ECU，ECU经过计算分析向悬架输出控制信号，增大悬架的刚度和阻尼，以抑制车身的侧倾。

② 制动车身点头控制。在汽车紧急制动时，车速传感

器的车速信号和制动开关的阶跃信号输入 ECU，控制器经过计算分析后输出控制信号，增大悬架的刚度和阻尼，以抑制车身的点头。

③ 起步车身俯仰控制。驾驶员猛踩油门使汽车突然起步或突然加速时，车速传感器的车速信号和节气门开度传感器的阶跃信号输入 ECU，ECU 经过计算分析后输出增加悬架的刚度和阻尼的控制信号，以抑制车身的俯仰。

(3) 车身高度控制。车身高度控制是在汽车行驶车速和路面变化时，ECU 对悬架输出控制信号，调控车身的高度，以确保汽车行驶的稳定性和通过性。

① 高速感应控制。当车速超过 90km/h 时，为了提高汽车的行驶稳定性和减少空气阻力，控制器输出控制号，使排气阀和高度控制阀通电工作，悬架气室向外排气，以降低车身的高度。当车速低于 60km/h 时，又恢复原有的高度。

② 连续差路面行驶控制。汽车在连续颠簸不平的差路面行驶，车身高度传感器连续 2.5s 以上输出大幅度的振动信号，如果车速在 40~90km/h 时，就会提高车身，以减弱来自路面的突然起伏感，并提高汽车的通过性能；如果速度在 90km/h 以上时，优先考虑汽车行驶的安全性，则降低车身高度。

改变车身高度是通过控制器输出的控制信号，使空气压缩机和高度控制阀通电工作，将压缩空气送入悬架空气室实现的。

3.4.1.2 空气悬架刚度和阻尼的调节控制

空气悬架由空气弹簧、减振器、空气管、执行器等组成，如图 1.3-64 所示。空气弹簧是在主、副气室内充入惰性压缩气体，利用气体的可压缩性起到弹簧作用。当弹簧上的载荷增加时，密闭在气室内的气体被压缩，气压升高，弹簧的刚度增大；当载荷减小时，气室内的气体气压下降，弹簧刚度减小。悬架刚度调节是由步进电动机带动空气控制阀转动，改变主、副气室之间通路的大小。如图 1.3-65 所示，当空气阀芯 8 的开口转到对准图示“低”位置时，主、副气室通路的大孔 9 被打开，主气室的气体经过阀芯的中间孔、阀体侧面的通道与副气室的气体连通，两气室的气体互相流动，参与承受载荷的气体容积增加，悬架的刚度降低处于低

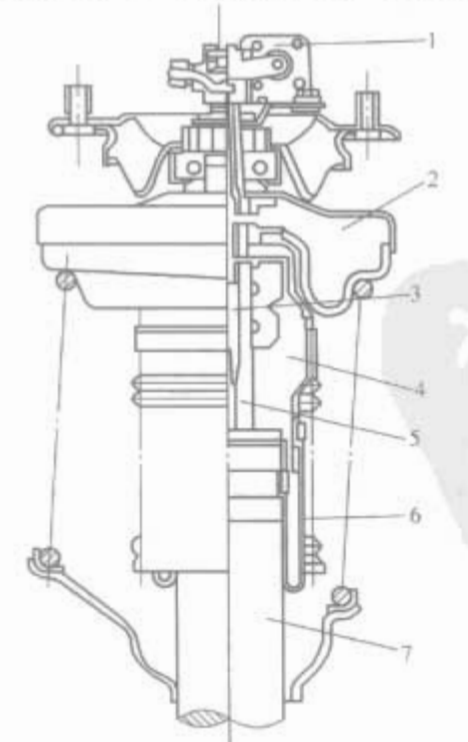


图 1.3-64 空气悬架的结构
1—执行器；2—副气室；3—减振器阻尼调解杆；4—主气室；5—减振器活塞杆；6—滚动膜；7—减振器

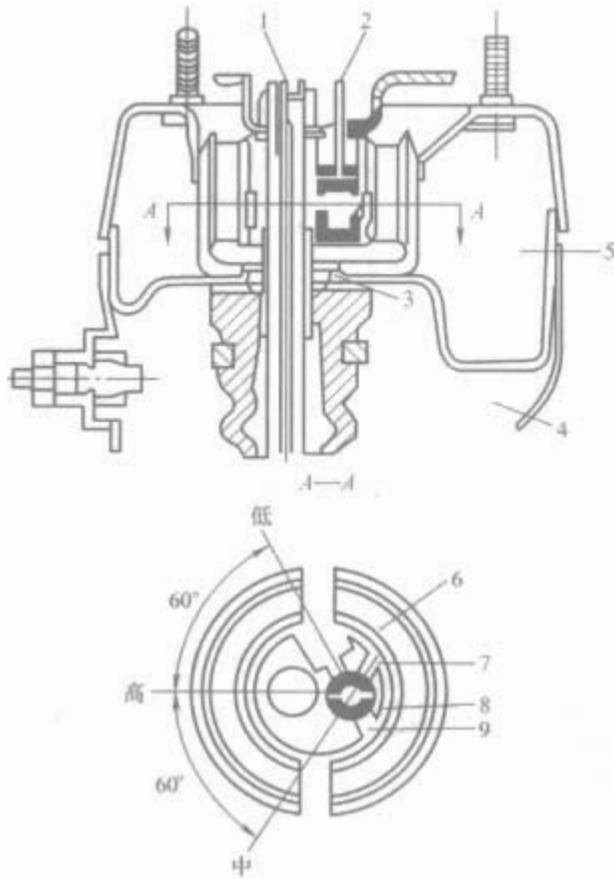


图 1.3-65 悬架刚度的调节原理

1—阻尼调解杆；2—气阀控制杆；3—主、副气室通路；
4—主气室；5—副气室；6—气阀体；7—气体通路小孔；
8—阀芯；9—气体通路大孔

状态。当阀芯 8 开口转到对准“中”的位置时，气体通路的小孔 7 被打开，主、副气室间的流量变小，悬架刚度增大，处于中状态。当阀体 8 开口转到对准“高”位置时，主、副气室间的通路被切断，只有主气室单独承受载荷，悬架刚度更进一步增大，处于高状态。通过转动与调节杆连接的转阀，使转阀上的三个阻尼孔分别处于开、闭状态，改变阻尼孔的流通面积，就可以实现阻尼大小的调节。

3.4.1.3 车身高度的调节

电子控制空气悬架可以实现汽车车身高度自动控制。当汽车高速行驶时，可自动降低车身高度，以提高行驶稳定性和空气动力学参数；在关闭点火开关后，能使汽车车身降低到目标高度，改善汽车驻车姿态；当乘客和载质量发生变化时，汽车可以保持在一个恒定的高度等。车身高度调节装置如图 1.3-66 所示，由空气压缩机及调节器 1、直流电动机 2、高度控制电磁阀 4、空气干燥器及排气阀 3 和悬架 ECU7 等组成，其工作原理如下。

(1) 气压的建立。发动机起动后，当处于充电状态时（如果发电机没有发电，此时空气压缩机将不工作，以防蓄电池放电），直流电动机将带动空气压缩机工作。空气经过滤后，从进气阀进入气缸，被压缩后的空气由排气阀流向空气干燥器，经干燥后空气进入储气筒。储气筒上有空气压力调节装置，气压达规定值时，空气压缩机将进气阀打开，使空气压缩机空转，防止消耗发动机的功率。储气筒的气压一般保持在 750~1000kPa。

(2) 车身高度的升高。当 ECU 发出提高车身高度的指令时，流量控制电磁阀和前后悬架控制电磁阀的进气阀打开，储气筒的空气进入空气弹簧使其气压提高，车身高度上升至规定高度时，各电磁阀关闭。

(3) 车身高度的降低。当 ECU 发出降低车身高度的指令时，流量控制电磁阀和前后悬架控制电磁阀的排气阀打开，空气弹簧中的空气经这些阀门流向储气筒的低压腔。当车身降低至预定调节高度时，各电磁阀关闭。

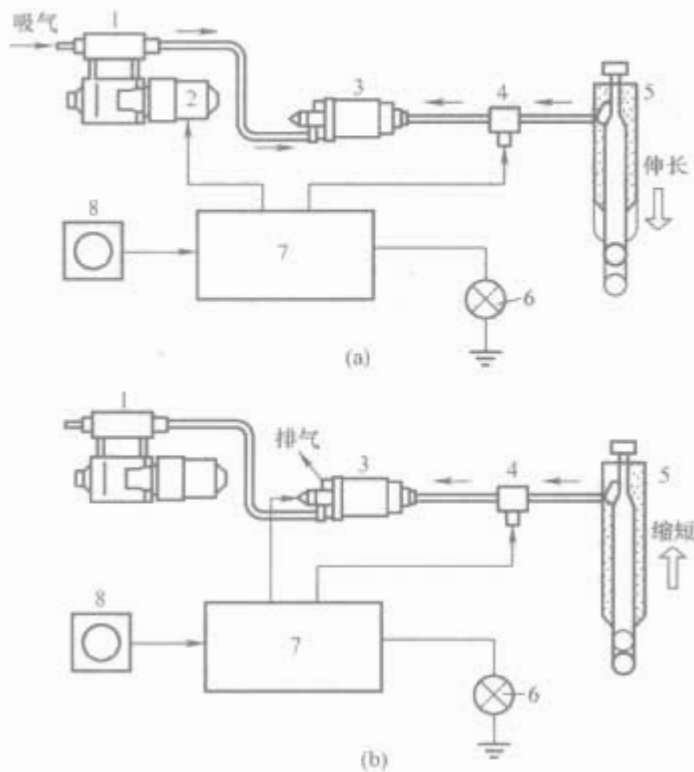


图 1.3-66 车身高度调节装置
(a) 充气，车身提高；(b) 排气，车身降低
1—空气压缩机及调节器；2—直流电动机；3—空气干燥器及排气阀；4—高度控制电磁阀；5—空气悬架；6—指示灯；7—悬架 ECU；8—车身高度传感器

(4) 空气的内部循环。由于该系统是一个封闭系统，从空气弹簧排出的空气并不排入大气，而是排入储气筒的低压腔。因此，当储气筒中需要补充气压时，低压腔中压力较高的空气又经空气压缩机进气阀进入气缸，被压缩和干燥后，进入储气筒的高压腔。这样，有助于提高充气效率，减少能源消耗，防止过多的水分进入系统污染元器件。

该系统的各空气弹簧为并联独立式布置，各空气弹簧可以单独进行充排气操作，互不干扰空气的流动。各控制电磁阀均由 ECU 进行控制。空气弹簧有三种工作状态，即低、正常和高。一般的行驶状态下，车身高度保持正常；车速超过 120km/h 时，车身高度为低；在 100km/h 以下时，车身高度为正常；在路面很差的路上行驶，车身高度为高，其他的车身高度由汽车的行驶状态来决定。

3.4.2 油气式主动悬架

这种悬架系统主要由液压系统和控制系统两部分组成。

3.4.2.1 液压式主动控制悬架的结构和工作原理

此系统根据 G(加速度)传感器的输出信号，控制各车轮执行器的油压，抑制车身姿势的变化，也降低来自路面的冲击。系统由液压系统和控制系统构成。油压系统主要由储油箱、液压泵、液压泵储压器、组合阀、主储压器、压力控制阀及执行器组成；控制系统主要由 4 个车身高度传感器(4 个车轮上各一个)、3 个垂直 G 传感器(一个在汽车前端，两个在汽车后端)、2 个横向垂直 G 传感器(在中间车架上)、1 个纵向垂直 G 传感器(也在中间车架上)、电子控制装置组成。

(1) 液压泵组成。作为系统动力源的液压泵，其结构如图 1.3-67 所示。液压泵组成为一串联式结构，前端为一个柱塞泵(供悬架系统用)，后端为一个叶片式液压泵(供动力转向系统用)，两个液压泵由一根轴驱动。悬架系统所采用的是一个流量控制型柱塞泵，它具有耐高速旋转及高压、能量损失少的特点、液压泵沿圆周布置有 7 个柱塞。在驱动轮

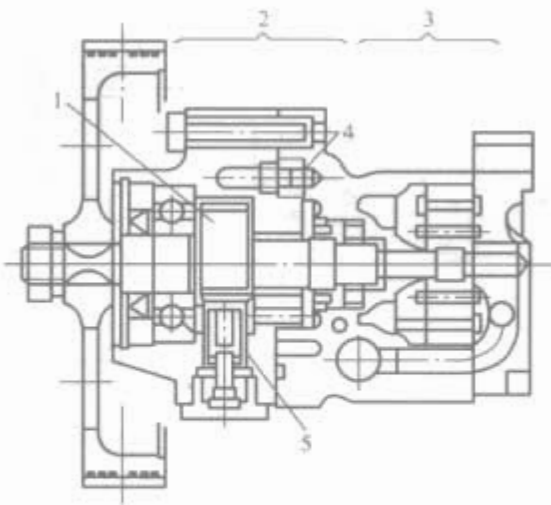


图 1.3-67 液压泵结构
1—凸轮；2—柱塞液压泵；3—叶片式液压泵；4—单向阀；5—柱塞

上的凸轮驱动下往复运动，为降低液压泵输出油压的脉动。液压泵内设有金属折箱型储压器。

(2) 主储压器。主储压器的构造如图 1.3-68 所示。主储

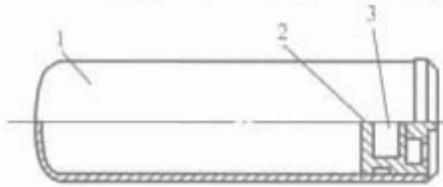


图 1.3-68 主储压器的构造
1—气室；2—自由活塞；3—油室

压器存储来自组合阀的油压，当执行器一旦需要大流量油液时进行补充，在发动机熄火时保持车身高度。主储压器一般为自由活塞型储压器，要求

高压、大容量、长时间可靠工作。

(3) 组合阀。组合阀用于油压系统的基本控制，是由多个不同功能的阀组合在一起的多功能阀装置(见图 1.3-69)。

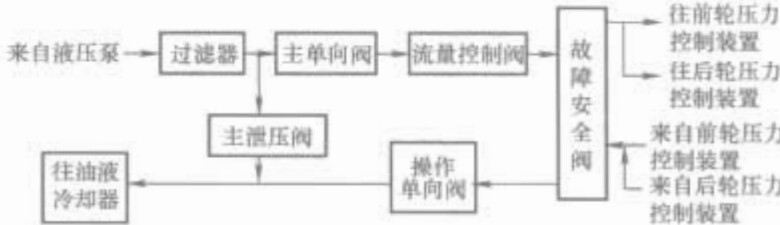


图 1.3-69 组合阀构成图

(4) 压力控制阀。压力控制阀和执行器的结构如图 1.3-70 所示。系统中有两个压力控制阀，均是同飞机上使用的伺服阀具有同等高精度、高响应性的导向比例电磁压力阀，它们分别位于汽车前端和后端，根据系统控制装置的控制信号，压力控制阀控制各轮执行器的油压。

压力控制阀主要有两个功能：主动控制功能，根据控制的输入信号，控制控制口的压力，以控制车身姿势；被动阻尼功能，路面输入的影响使执行器内的压力发生变化时，将执行器内压力经控制口反馈到阀杆，以产生最佳的阻尼力。

(5) 执行器。执行器的结构如图 1.3-70 所示。执行器由液压缸、副储压器和阻尼阀组成。由于悬架系统使用了辅助螺旋弹簧，降低了支撑车身所需的系统油压，减小了动力损耗。为吸收、衰减弹簧下的高频振动，在底部设有副储压器和阻尼阀。

(6) G 传感器。悬架系统使用了 6 个 G 传感器，用以检测汽车在各种行驶条件下产生的车身加速度，它们是：1 个纵向 G 传感器，2 个横向 G 传感器和 3 个垂直 G 传感器。这些 G 传感器均为钢球位移检测型传感器，可向电子控制

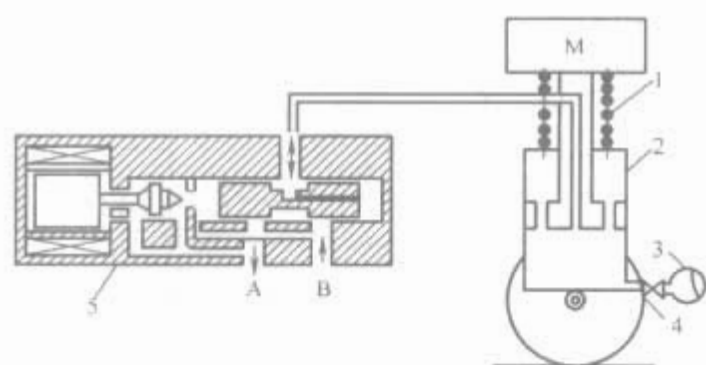


图 1.3-70 压力控制阀和执行器的结构示意图
A—回油口；B—进油口
1—螺旋弹簧；2—执行器；3—副储压器；
4—阻尼阀；5—压力控制阀

装置提供对应于车身的纵向力、横向力和垂直力。

(7) 电子控制装置。电子控制装置包括两个高速 16 位微处理器(MCU1 和 MCU2)，运算速度非常快(见图 1.3-71)。

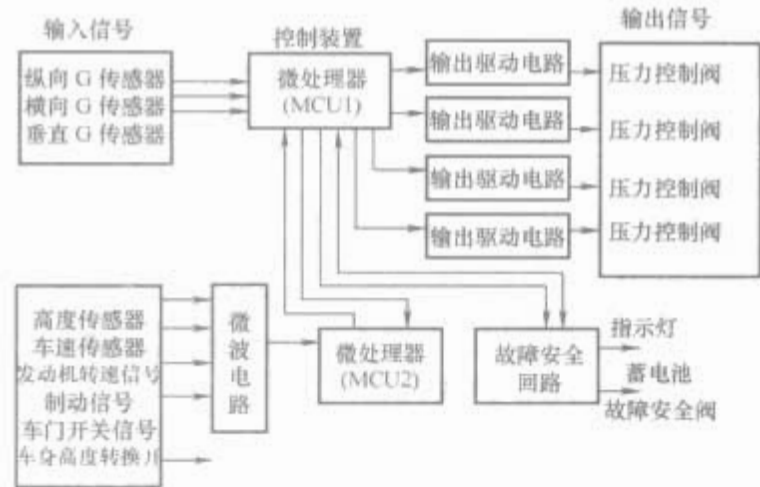


图 1.3-71 电子控制装置的内部构造和主要输入信号

微处理器 MCU1 处理来自 G 传感器的信号，并把控制信号输送到压力控制阀的驱动电磁线圈内，微处理器 MCU2 处理来自高度传感器的信号，并把控制信号输送到压力控制阀的驱动电磁线圈内。MCU1 和 MCU2 一直相互联系，一方发生异常时，就把信号输入故障安全回路，使故障安全阀动作，以确保安全性。

3.4.2.2 系统的控制功能

(1) 侧倾控制功能。汽车转弯时，在离心力作用下车身欲发生侧倾，由横向 G 加速度测得此离心力，系统控制装置根据此离心力的大小，按比例增加外侧车轮悬架的液压，降低内侧车轮的液压，以抵消汽车离心力，防止车身侧倾。

(2) 俯仰振动控制功能。汽车制动时，汽车产生向前的惯性力，系统通过纵向 G 传感器测得汽车向前的惯性力，系统控制装置则根据此控制力的大小，按比例增大前轮执行器产生的作用力，以抵消惯性力，控制车身的俯仰振动。汽车起步时的控制过程与上述过程相反。

(3) 上下振动控制功能。当汽车行驶于不平路面时，来自路面的冲击使车身发生上下振动，根据车身上下振动的绝对速度，系统控制各车轮执行器产生的作用力。此绝对速度可将汽车垂直 G 传感器测得的车身垂直方向的加速度积分求得。此控制方式采用的是天棚阻尼器控制理论。

(4) 车身高度控制功能。根据各车轮部分的高度传感器测得的车身高度变化信号，系统控制装置自动使车身高度维持为一个定值(不管载荷如何变化)。

4 汽车转向控制系统

4.1 转向助力控制系统

为了解决汽车转向系统的转向轻便与灵敏的矛盾，越来越多的汽车上使用了动力转向系统，动力转向系统是兼用体力和发动机动力为能源的转向系统。通常，汽车转向所需能量只有小部分由驾驶员靠体能提供，其余大部分则通过发动机驱动的油泵(或空气压缩机)将发动机部分输出机械能转化为压力能，并在转向盘控制下，对转向传动装置或执行器中某一传动件施加不同的液压(气压)作用力，以减轻驾驶员长时间驾车的疲劳。

使用表明，汽车转向系统除了应满足轻便和灵敏的要求外，还应该在行车中对驾车员造成一定的“路感”，一般说来，无论在低车速、小转向角工况，还是在高车速、小转向角工况中，汽车均应该具有适度的转向盘手力；随着车速的提高，转向盘手力不宜过轻，必须维持一定的数值。图 1.3-72 所示为一组电子控制液动力转向系统转向盘操作力的特性，汽车低速行驶时特性曲线很窄，具有大助力作用的特点，当车速提高后特性曲线变宽，助力作用逐渐减小，这样可以有效防止出现高速时转向盘手力太轻。

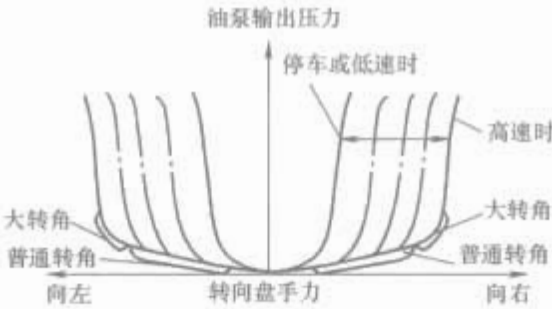


图 1.3-72 电子控制液动力转向系统的转向盘操作力特性

上述事实对现代汽车动力转向系统提出了更高的要求，即它除了应该具有良好的随动性、高度的转向灵敏度和良好的稳定性以外，还应该随车速变化对转向助力做出调整。方向盘高速时的路感和低速时的强助力，以及两种状态之间的平稳转换都必须引起重视。

显然，仅依靠简单的液压助力转向方式已难以满足日益提高的要求，可变助力动力转向系统便应运而生，它能够根据车速和转向盘转角提供不同的助力水平，如当汽车怠速或低速行驶时，动力转向系统以大助力来帮助车辆方便地实现大转向；由于高速大转向行驶时，过大的助力会削弱路感，因此助力将随着车速成比例地减小；在紧急情况下如果驾驶员猛拉转向盘，许多系统会恢复到完全助力状态。

可变助力动力转向系统有液压和电子控制两种类型，它们在基本动力转向基础上利用液压或电子控制装置，达到改变助力效果的目的。

如图 1.3-73 所示，液压型可变助力转向系统利用转子流量型速度感应油泵 4 实现变助力转向控制，速度感应油泵由相互啮合的内转子和外转子组成，内外转子偏心安装，当内转子顺时针旋转时带动外转子旋转，偏心的内外转子轮齿之间产生的油腔容积改变，使容积逐渐变大的左侧成为吸油腔，而容积逐渐变小的右侧成为出油腔。由差速器齿轮传动的速度感应油泵内转子随车速变化而变化，汽车运动速度越快，转子转动速度越高，速度感应油泵泵出的油量越大。所以它可以根据车速提供变化的油压。除了基本动力转向系统所用元件外，这一系统还包含了改变助力油压水平的压力控

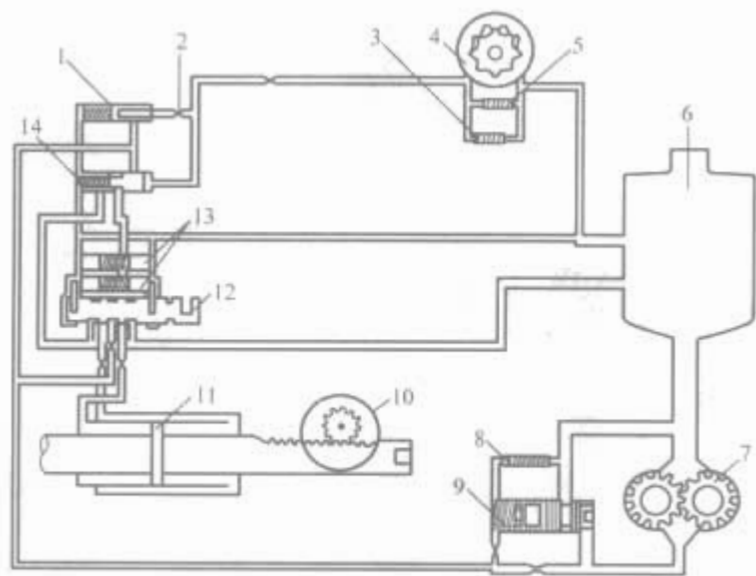


图 1.3-73 液压型可变助力转向系统
1—压力控制阀；2—速度感应油泵节流孔；
3—溢流阀；4—速度感应油泵；5—单向阀；
6—储油罐；7—油泵；8—减压阀；9—调节阀；
10—转向机；11—助力活塞；12—转向机控制阀；
13—反作用油缸；14—增益控制阀

制阀 1、速度感应油泵节流孔 2、带有单向阀 5 或溢流阀 3 的速度感应油泵 4、增益控制阀 14 和双反作用油缸 13 等（见图 1.3-73）。

速度感应油泵从系统吸出的油液来自速度感应油泵节流孔油道的流量降，当速度感应油泵从该通道泵油时，液压下降。由于这种压力降作用在增益控制阀上，所以速度感应油泵的动作会影响该阀的工作方式。

速度感应油泵内的单向阀和卸荷阀利用弹簧和球阀实现油液的单向流动，高速时，速度感应油泵可以从动力转向系统泵出比系统提供的更多油液，单向阀允许油液从油泵出口流回到入口供给速度感应油泵。当汽车倒车时，速度感应油泵倒转，将油液从储油罐泵入动力转向系统。为了避免系统压力过高，卸荷阀可以从速度感应油泵入口向出口排出部分油液。

压力控制阀将来自油泵的压力调制成稳定的液压，经过速度感应油泵节流孔送入速度感应油泵，速度感应油泵引起的压力变化将影响到速度感应油泵节流孔（包括增益控制阀）流量下降（见图 1.3-74）。

增益控制阀与反作用油缸一起工作，提供随速度感应油泵状态变化的附加转向助力效果。在增益控制阀中弹簧力作用在阀的一端，由速度感应油泵控制的液压作用在阀的另一端，来自油泵的油液经过阀芯根据阀所处位置可以流向反作用油缸或储油罐。

反作用油缸均由内设中心弹簧和两端柱塞的缸筒组成，

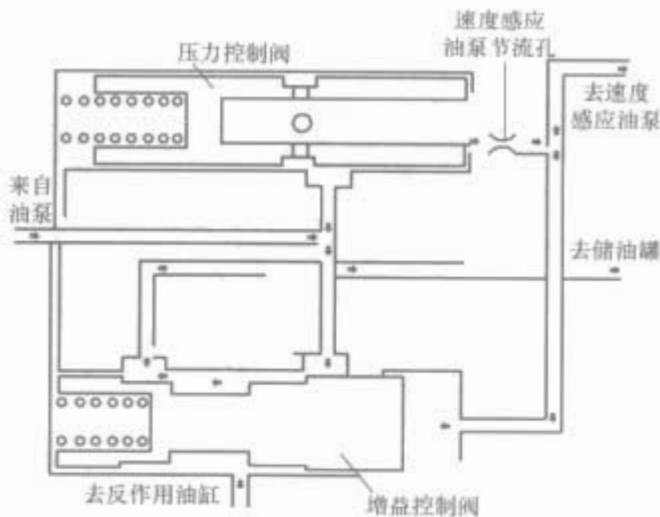


图 1.3-74 压力控制阀调节系统压力

控制阀助力压力增高流过每个反作用柱塞的外边。当反作用油缸内压力减小时，柱塞相互靠拢，允许更多的油液流过，产生较大的助力；当油缸压力增加时，将柱塞向外推动，切断油流，减小助力（见图 1.3-75）。怠速时，速度感应油泵不从液压系统吸油，所以高压推动该阀压缩弹簧，此时阀直接将大多数油液导向储油罐，反作用缸处于低压，油液能够无阻碍地流到控制阀助力。随着车速增加，速度感应油泵开始将油泵出系统，降低阀上的压力。弹簧将阀朝外推动，此时阀会将更多的油液送入反作用油缸，反作用油缸压力的增加推出柱塞，减少控制阀的油流。高速时，速度感应油泵从系统泵出许多油液，所以弹簧克服液压，向反向推动阀门，此时，阀门直接将最多的油流送入反作用油缸，油缸中的高压向外推动柱塞，堵住流往控制阀的油液，所以无压力增加入液压助力系统。

将电子控制技术引入转向助力系统能够使得控制更加容易、结构更加简单，且重量更轻、能耗更小。电子控制式动力转向系统是指以电子控制单元为控制核心，以各种转向传感器（车速、转向盘转角或转速、转向转矩等）信号为控制依据，经过计算分析得出最佳控制推力，通过电磁阀、电动机或其他电控执行器实现转向助力控制的一种方式。若按照系统执行机构的不同，它可分为电子控制式液压助力转向系统和电子控制式电力助力转向系统两种。

电子控制式液压助力转向系统仍以液压元件作为系统执行元件，电子控制单元一方面可以对供能装置加以控制，通过调节油泵的运转达到调节转向助力大小的目的（见图 1.3-76），此种方式能够根据汽车行驶状态，在需要助推力的时候，让转向助力油泵工作，所以它可以比油泵经常工作的普通液压动力转向系统减少发动机功率的损耗，且结构紧凑，布置方便。另一方面，电子控制单元也可作为液压系统回路中的开关对助力系统进行力的调节控制。



图 1.3-75 增益控制阀与反作用油缸工作原理
(a)怠速状态；(b)中速状态；(c)高速状态
1—增益控制阀；2—反作用油缸

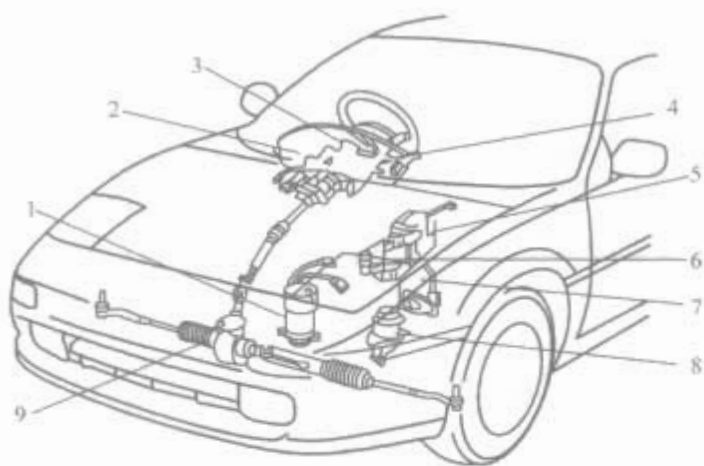


图 1.3-76 电子控制式液压动力转向系统
1—电子控制油泵；2—车速传感器；3—转向传感器；
4—报警灯；5—电子控制单元；6—转向继电器；
7—动力转向执行装置；8—储液罐；
9—转向齿轮机构

电子控制式电力助力转向系统却是以电动机为系统的执行元件，电子控制装置通过受控的电动机对汽车转向机械部件进行控制。

电子控制式液压动力转向系统可以较方便地实现低速时的大助力和高速时的小助力，当行驶车速增加时，电子控制装置能使得系统的液压助力作用减弱，系统只需要不到 5N 的转向操纵力，而在高速时却需多加 14N 的转向操纵力，这样可让驾驶员在高速行车时，能对方向盘有更好的控制感觉。

汽车上比较常见的一种电子控制液压助力转向系统是在转向系统的液压回路中。并联一个由旁通流量控制阀控制的旁路，该旁通流量控制阀可以根据车速、方向盘转角及转动速度等传感器提供的汽车行驶状态信号，由电子控制装置对旁路的液压分流加以控制，从而实现对动力转向系统油压的调节控制（见图 1.3-77）。

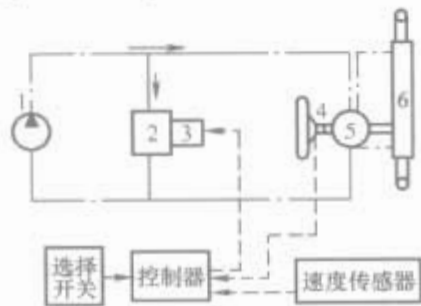


图 1.3-77 带旁通流量控制阀的电子控制动力转向系统
1—转向油泵；2—旁通流量控制阀；3—电磁阀；
4—转向速度传感器；5—转向控制阀；6—动力转向器
—— 液压回路；—— 电路

电子控制式电力助力（齿轮齿条）转向系统由发电机、传感器、电动机、电子控制装置和电力/电子齿轮齿条转向器等部分构成。除了发电机以外，该装置中的大多数都集成安装在一起。转向器齿条从直流电动机电枢随动轴中间穿过（见图 1.3-78），它从结构上可以保证，齿条和壳体能使电枢的旋转运动转换为齿条通过带有推力轴承转向螺母的直线运动。

转向系统工作时，一方面有转向盘带动机械转向机实现部分人力转向，另一方面通过传感器和电子控制装置驱动辅助转向电动机。电枢的旋转运动借助传动齿轮副 6 使助力蜗杆 7 转动（见图 1.3-78）。然后，由循环球和螺母将旋转运动变为直线往复运动，形成转向助力。

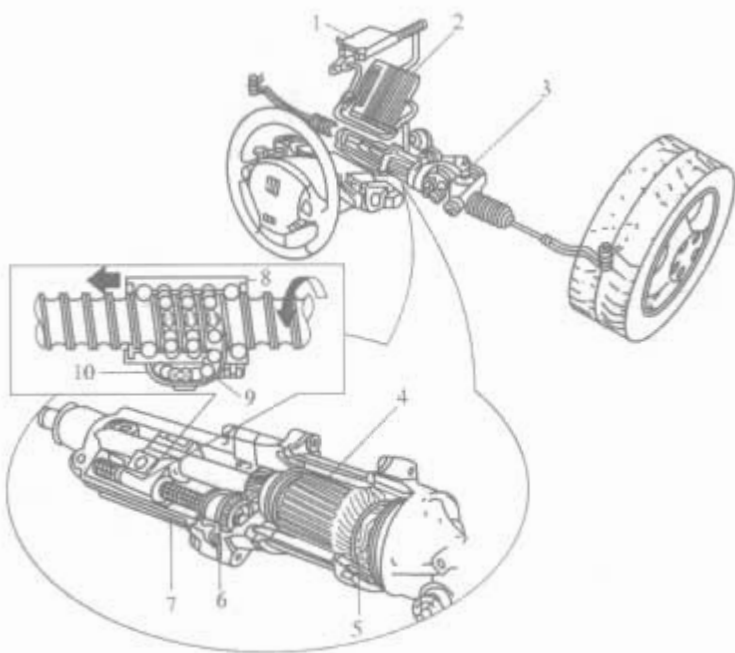


图 1.3-78 电力/电子控制式齿轮齿条动力转向系统
1—控制装置；2—动力装置；3—转向机；
4—转子；5—电刷；6—传动齿轮副；
7—滚珠蜗杆；8—螺母；9—循环钢球；
10—导管

助力系统可以通过改变电动机的供电极性控制电动机的旋转方向，并可同时按需要的转矩，提供所需电流（可达 75A）。电流越强，施加于齿条上的作用力越大。

系统通过安装在齿轮齿条式转向器输入轴上的传感器来检测方向盘的转动情况，当电子控制装置接收到来自传感器的转动方向和载荷大小信号后，发出不同的助力指令，控制电动机动作。

这种动力转向系统具有以下一些特点：不直接消耗发动机动力，无需液压传递回路，系统无液压泄漏之虑，安装自由度大，较容易实现在各种车辆上的变型。由于其动力源不是靠发动机驱动的油泵，因此，即使当发动机熄火时，它还能提供转向所需的助力。此外，其转向手感可以按照汽车和驾驶者的特性加以调节。但是，由于电力助力效果小于液压助力，所以还只适用于前轴负荷较小的某些轿车。

4.2 四轮转向控制系统

1962 年日本工程师率先提出了以四轮转向（4WS）提高车辆操纵稳定性的设想，二十多年后汽车的四轮转向系统才得到了实际应用。1990 年日本的本田、马自达和尼桑三家汽车公司在各自部分轿车产品上推出了四轮转向系统，一年后美国克莱斯勒和日本三菱汽车公司也相继开发出具有四轮转向功能的车型，从此，四轮转向技术逐渐成为了现代汽车转向控制的一个重要方面。

四轮转向系统是同时能对汽车四个车轮实施转向控制的系统。它结合传统汽车前轮转向系统利用特殊的传动方式联动后轮实现转向，以提高车辆转向机动性或转向操纵稳定性。由于控制方式的不同，四轮转向系统可以分为机械式四轮转向、机电组合控制四轮转向和电控四轮转向三种类型（见图 1.3-79），电控四轮转向系统又可根据控制方式的不同分为电控—电动四轮转向和电控—液压驱动四轮转向两类。

四轮转向汽车既可以在低速行驶时让后轮产生与前轮相反的偏转，使汽车获得更小的转弯半径，提高汽车的机动性；也可以在汽车高速行驶时，让后轮产生与前轮同方向的偏转，减小轮胎的侧偏角和车身的横向摆动，使汽车具有更好的操纵稳定性。概括说来，四轮转向汽车的后轮转向有三

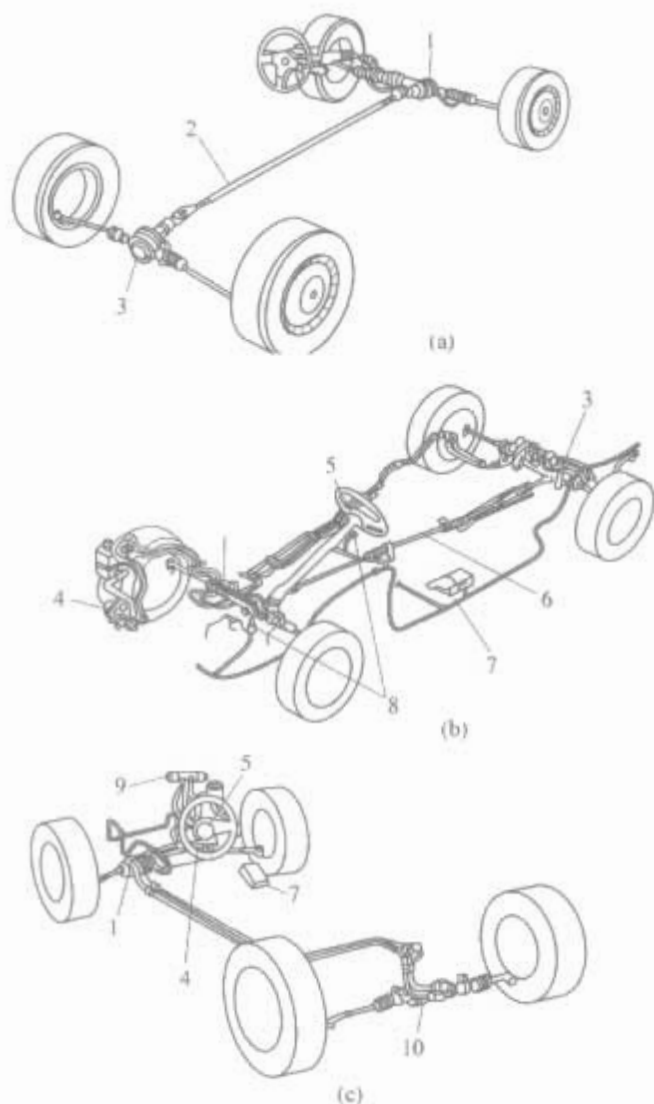


图 1.3-79 四轮转向的类型
(a) 机械式四轮转向；(b) 机电组合控制四轮转向；
(c) 电控四轮转向
1—前轮转向器；2—中央传动轴；3—后轮转向器；
4—转向油泵；5—转向角度传感器；6—转向角度传
输轴；7—控制单元；8—速度传感器；9—主动悬架
控制阀；10—后轮转向动力缸

种方式：

- (1) 同相位偏转方式。在高速行驶时，后轮与前轮同方向偏转。
- (2) 逆相位偏转方式。在低速行驶时，后轮与前轮逆方向偏转。
- (3) 同相位与逆相位组合偏转方式。在低速或急转弯行驶时，后轮先逆向偏转，再同向偏转。

当然，采用四轮转向技术的汽车对行驶性能带来益处的同时，对传统驾驶习惯也是一种挑战。四轮转向汽车驶入或驶离障碍物时会产生明显与普通汽车不同的表现特征。无论后轮采用同相位偏转还是逆相位偏转，汽车后部扫过的面积均有所增大，也即汽车后部与周围物体发生磕碰的可能性增大。因此，具有四轮转向的汽车其后轮偏转角度往往都不大，一般为 5° 左右。

机械式四轮转向系统是利用后轮机械式转向器〔见图 1.3-80 (a)〕实现后轮的转向控制。它主要由偏心轴 3、偏心小齿轮 2、内齿轮 4、滑块 5、导向块 6 和摆动杆 8 等部件组成。偏心轴 3 用轴承支撑在转向器壳体 1 内，其后端通过花键与万向节连接，万向节再与中央传动轴连接。导向块 6 固定在摆动杆 8 上，摆动杆分别与左右横拉杆连接，这些装置将中央传动轴传来的旋转运动转变为摆动杆的横向运动，通过左右横拉杆带动后轮偏转。

该结构工作原理如图 1.3-80 (b) 所示，当汽车向右转

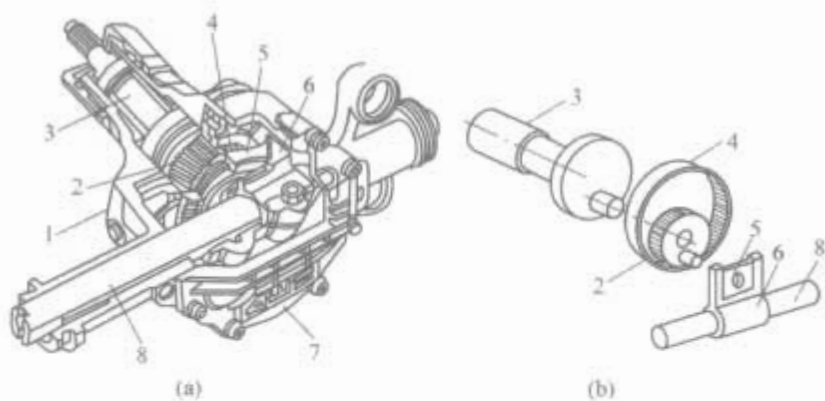


图 1.3-80 机械式后轮转向器
(a) 结构图；(b) 原理图
1—转向器壳体；2—偏心小齿轮；3—偏心轴；
4—内齿轮；5—滑块；6—导向块；
7—转向器盖；8—摆动杆

弯时，中心传动轴带动偏心轴 3 顺时针旋转，偏心小齿轮 2 绕固定的内齿轮 4 的轴线作顺时针公转，同时又绕自己的轴线作逆时针自转。小齿轮 2 上的偏心短轴颈将旋转运动传递给滑块 5，由滑块 5 将旋转运动转变为导向块的左右移动。滑块也即摆动杆 8 的水平运动规律是线右后左移动，摆动杆带动后轮发生转向，产生如图 1.3-81 所示的转向特性。后轮能够随方向盘的转动在 5° 之内产生与前轮先同向后逆向的偏转。这种由机械结构决定的转向特性与车速无关，所以，在低速转向时方向盘必须转过约 200° 后，后轮才能逆向偏转，这种情况并不符合提高汽车机动性的要求。

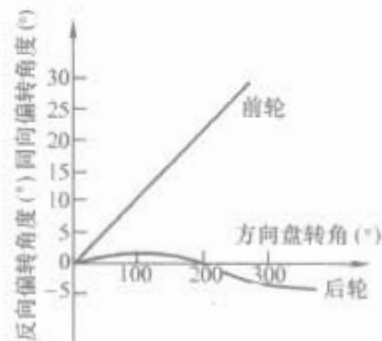


图 1.3-81 机械式
四轮转向特性

为了进一步利用车速控制后轮转向规律，四轮转向系统可以将车速信号引入控制系统。图 1.3-82 所示的转向系统

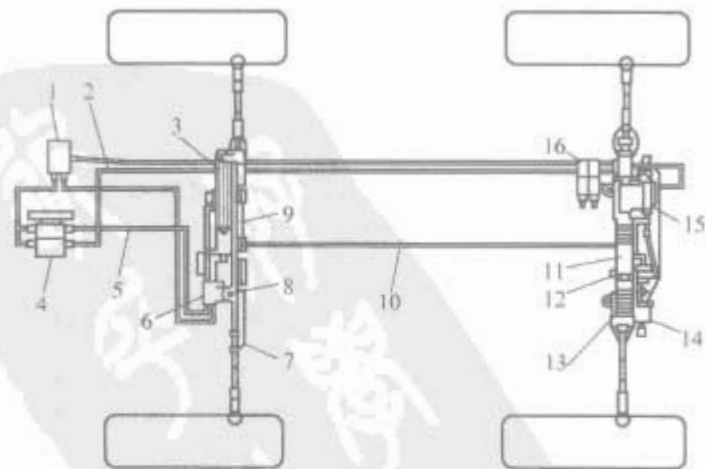


图 1.3-82 机电组合控制—液压驱动四轮转向系统
1—储油罐；2—后转向器进油管；3—前轮转向器动力缸；
4—转向油泵；5—前轮转向器进油管；6—转向控制阀；
7—前轮转向器；8—主动小齿轮（接方向盘）；9—转向齿条；
10—转向角度传输轴；11—动力输出杆；12—转向比例传感器；
13—回位弹簧；14—步进电机；15—控制阀；16—失效安全磁阀

采用了机电组合控制的方式，以液压驱动四轮转向的控制系统。在该系统中，后轮的偏转方向可以根据车速传感器提供的车速信号做出调节控制，而其偏转角度则由机械传动系统实施控制。图 1.3-82 中前后车轮转向器分别由各自的液压系统驱动，两套液压系统所需液压动力由转向油泵提供，后轮转向器通过转向横拉杆能够连动两后轮。此外，当电控装置或液压装置失效时，在后轮转向器安全系统作用下后轮能够自动回正，将汽车恢复成为两轮转向车辆，以确保行车的安全。

采用这种控制方式后，四轮转向系统可以获得图 1.3-83 所示的转向特性，其后轮的偏转方向与方向盘转角无关，而是通过传感器由车速控制。即当车速在 35km/h 以下时，后轮逆相位偏转，实现低速时提高转向灵敏度的要求；当车速超过 35km/h 后，后轮同相位偏转，以保证高速转向时汽车良好的操纵稳定性。此时，后轮的偏转角度仍直接与方向盘转角大小发生随动关系。

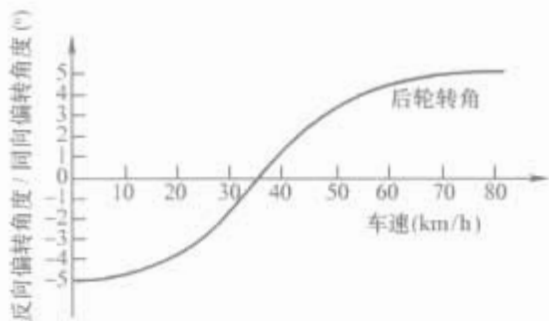


图 1.3-83 电控四轮转向特性

为了实现上述的转向关系，该系统专门设置了后轮转向相位控制系统，其结构组成如图 1.3-84 所示，主要包括步进电动机 1、控制接头 2、控制杆 4、控制阀 6、小锥齿轮 7、主锥齿轮 9、摇臂 10、传感器等结构组件。控制杆 4 穿过主锥齿轮上的孔，其右端与控制阀输入杆 5 用球头销连接，左端与摇臂 10 连接。摇臂固定在控制接头 2 上，控制接头与前端短轴上的蜗杆啮合，短轴一端带有锥齿轮并与步进电动机的小锥齿轮啮合，步进电动机由 ECU 根据车速传感器信号操纵。

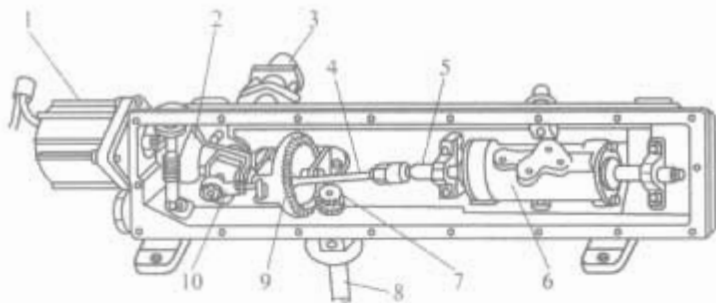


图 1.3-84 后轮转向器及相位控制系统

- 1—步进电动机；2—控制接头；3—前、后轮转向比例传感器；4—控制杆；5—控制阀输入杆；6—控制阀；7—小锥齿轮；8—输入轴；9—主锥齿轮；10—摇臂

汽车转向时，前轮转向器将方向盘转角信号经输入轴 8 传递给小锥齿轮 7 和主锥齿轮 9，并带动控制杆 4 摆动，使其长度产生变化，再通过球头销带动控制阀输入杆 5 左右移动，从而操纵控制阀改变流向动力缸的油路，达到控制后轮左右偏转的目的。步进电动机 1 根据车速自动调整控制接头的位置，用于控制后轮的偏转力向。

当车速低于 35km/h 时，步进电动机 1 和输入轴 8 一起调整控制杆 4 的位置，精确地控制由控制阀 6 流向动力缸的油路，以保证后轮的偏转方向与前轮相反，使汽车在低速行

驶时能获得良好的转向机动性。当车速等于 35km/h 时，步进电动机 1 和输入轴 8 一起调整控制杆 4 的位置，使控制阀 6 停止向动力缸供油，保证后轮沿直线行驶位置（后轮不偏转）。当车速高于 35km/h 时，步进电动机 1 和输入轴 8 一起调整控制杆 4 的位置，改变控制阀 6 流向动力缸的油路，使得后轮的偏转方向与前轮相同，保证汽车高速行驶的安全性和操纵稳定性。

根据车速控制后轮转向也可以通过电子控制、液压执行的四轮转向系统得以实现，这时的后轮偏转方向和角度完全由电子控制单元根据传感器信号加以调节，在前轮与后轮转向器之间不存在任何机械联系，后轮靠转向油泵产生的液压驱动转向。

此外，还可以通过电子控制利用电动方式组成四轮转向系统，后轮以电动机驱动的方式实现转向，系统的电子控制单元可以根据各种传感器信号向电动机发出控制指令。由于这种控制方式的前轮与后轮转向器之间没有任何机械连接装置，因此具有结构简单，重量轻，制造成本低，整体布置方便灵活，且能够获得更加精确和复杂的后轮转向特性等优点。

ECU 获取转向盘转速与旋向、车辆行驶速度、前轮转向角度、后轮转角和转速等信息，加以快速地计算和分析，然后对后轮的转向角度和偏转方向做出适当的调节控制。在该控制系统中（见图 1.3-85），位于后轮转向器左侧的主后转角传感器 2 内产生的脉冲转环随循环球螺杆一起转动，并将左后轮转角信号传递给 ECU。位于后轮转向执行器的另外一侧的副后转角传感器 5 用来测量右侧后轮的转角。通过电压信号也传送到电子控制单元。主前转角传感器 1 安装在组合开关下面的转向柱上。其中包括测量方向盘转动的速度和方向两个传感器。副前转角传感器 2 安装在前齿轮齿条转向器内，用于测量前轮的转角。每个后轮均安装有后轮速度传感器 4、8，用于测量每个后轮的转速。

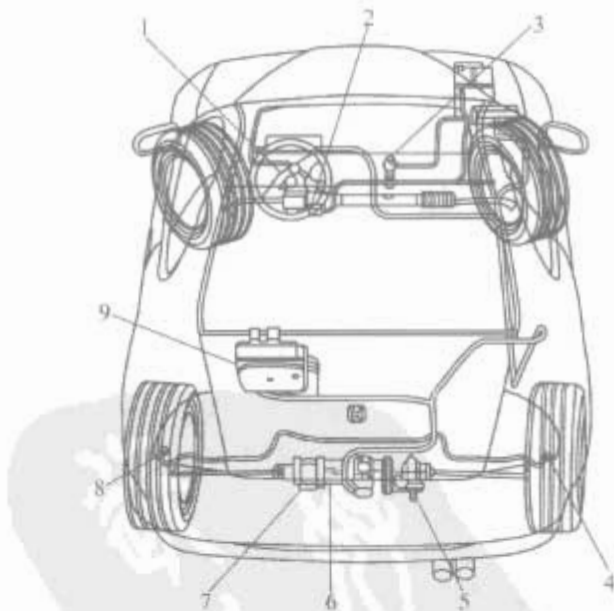


图 1.3-85 电控—电动四轮转向系统

- 1—主前转角传感器；2—副前转角传感器；3—车辆速度传感器；4、8—后轮速度传感器；5—副后转角传感器；6—后轮转角传感器；7—主后转角传感器；9—四轮转向控制单元

该电控四轮转向系统可以实现如图 1.3-86 所示的转向特性。当车速小于 29km/h 时，后轮立即与前轮反向偏转，其偏转角度的大小与车速有关；在车速等于 29km/h 时，后轮偏转角度为 0；当车速大于 29km/h 后，后轮与前轮同向偏转。

后轮转向器类似于电动转向器，其结构如图 1.3-87 所

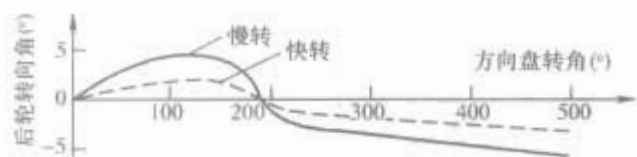


图 1.3-86 电控四轮转向特性

示，主要包括由定子 3 和转子 9 组成的电动机、循环球螺杆机构 10 等。循环球螺杆机构通过万向节与左右后横拉杆连接，换向器 7 用于控制循环球螺杆机构的转动方向。汽车转向时，控制单元根据传感器的信号进行计算，并将计算结果信号输送到后轮转向转向器内的电动机，控制电动机转动，电动机驱动循环球螺杆机构，再通过万向节将动力传递到左右横拉杆，从而带动后轮偏转。当汽车点火开关关闭或四轮转向系统失效时，回位弹簧 6 用于保证后轮的回正。确保行车安全。

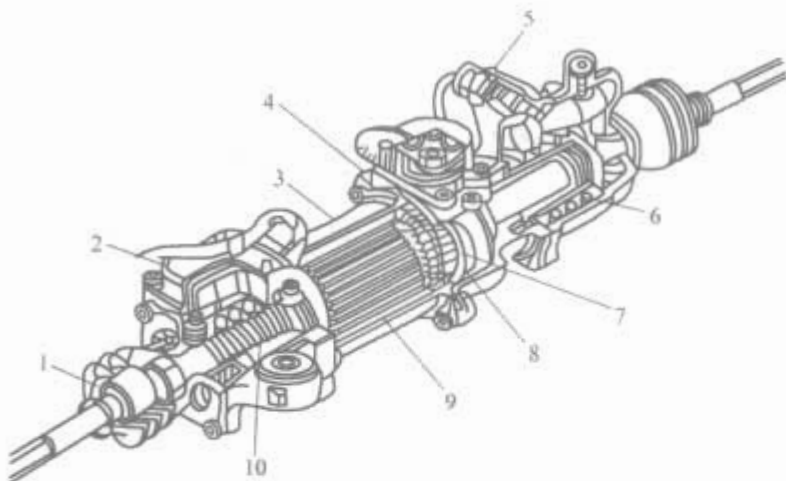


图 1.3-87 后轮转向器

- 1—转向轴螺杆；2—主后转角传感器；3—定子；4—转向执行器壳体；5—副后转角传感器；6—回位弹簧；7—换向器；8—电刷；9—转子；10—循环球螺杆机构

第4章 汽车安全运行电气控制系统

1 故障自诊断系统

在汽车运行过程中,为了能够及时发现电子控制系统故障,并在发生故障后尽可能使汽车保持基本的运转能力,以便维持汽车行驶到修理厂修理,现代汽车电子控制系统都设置有车载故障诊断系统,简称故障自诊断系统或自诊断系统。

1.1 汽车故障诊断技术的发展趋势

汽车故障诊断是在不解体(或仅卸下个别小件)的条件下,确定汽车技术状况,查明故障部位及原因的检查和分析。随着汽车技术的发展,特别是电子技术、计算机技术在汽车上的应用,汽车故障诊断从传统的听、看、闻经验诊断方式,发展为以集成化、智能化的诊断设备为手段,以信息技术为依托的现代汽车故障诊断技术。

1.1.1 汽车诊断技术的发展

汽车诊断从人工定性检查质变为利用设备、仪器的定量检测,从现场或试车发展为相关性实验台架的测试。无论是国内还是国外,汽车诊断技术均发生了质的飞跃。

1.1.1.1 国外汽车诊断技术的发展

20世纪50年代之前,国外就研发了以故障诊断和性能调试为主的单项检测技术。早期的检测诊断设备是以机械结构为主,单机人工操作。20世纪60年代,随着机电一体化的产生,研制了单机自动化的设备,如四轮定位仪、非接触式速度计等;80年代,随着计算机技术的发展和运用,实现了汽车诊断控制自动化,出现了集检测工艺、操作、数据采集、存储和打印等功能于一体的系统软件。车载自诊断系统和车外诊断系统正在进一步发展。

车载自诊断系统(On Board Diagnosis System, OBD)利用安装在汽车内各个部位的传感器,自动检测系统故障,以故障代码形式显示并将故障信息存入电子控制单元(ECU)的RAM中,在维修车辆时,维修人员能调出故障代码,找出故障部位。1994年,美国汽车工程师协会在第1代OBD基础上,制定了第2代在线诊断标准OBDⅡ。OBDⅡ除了对电子控制系统检测外,还对与排放有关的系统监测,更注重绿色环保问题。车外诊断系统通过传感器采集信号,送至车外仪器,在相应诊断软件的支持下,完成各种诊断。例如:发动机综合分析仪等。

1.1.1.2 国内汽车诊断技术的发展

我国是20世纪60年代开始研究检测技术,如发动机气缸漏气量检测仪等;80年代,随着汽车工业的发展,汽车诊断技术得到了迅速发展;到90年代,相继研制了侧滑试验台、制动试验台、汽车检测站以及我国自主开发的发动机故障诊断仪、四轮定位仪等。汽车检测站综合运用现代检测技术和设备对汽车进行不解体或不完全解体条件下的性能检测诊断,实现了以汽车安全性能为主到综合性能的检测。国产车在汽车电子控制方面也广泛应用了OBDⅠ,但根据我国目前的排放法规,OBDⅡ还没有在国产车上使用。

1.1.2 现代汽车故障诊断技术的特征

现代汽车诊断技术是在传统诊断技术的基础上发展起来的,具有以下几个特征:故障诊断系统智能化、诊断推理方法多样化、故障诊断信息网络化。

1.1.2.1 故障诊断系统智能化

车载自诊断或使用故障诊断设备的诊断主要诊断电子控制系统的故障,而且还有局限性,不能对ECU存储的数据进行分析。既用于电控系统又适用机械系统故障的诊断技术,是现代汽车诊断技术的关键。人工智能技术的迅速发展,新的故障诊断系统即专家系统被开发并逐步推向应用。

20世纪70年代,国外汽车公司开始研究汽车故障诊断专家系统主要针对发动机;到90年代,研究范围扩大到汽车各个系统总成。国内在这个方面研究较晚,始于20世纪80年代末,到90年代中后期,部分研究达到了国外相同水平。汽车故障诊断专家系统能模拟人类专家对复杂系统进行诊断,高效而准确地得出诊断结论,若与外部软件连接还可扩大诊断范围,具有咨询、存储和修改等功能。

1.1.2.2 诊断推理方法多样化

诊断推理是以诊断特征参数为基础,采用数学方法处理信号,找出故障的内在联系,对系统的故障做定量分析。基于信号的处理,由传统的傅里叶变换转化为小波分析,为故障信号的预处理提供了有效的途径;基于知识的处理,由传统的基于逻辑的专家系统发展为集成模糊集理论和案例的专家系统,解决了故障症状不确定性,很大提高了诊断速度和精度。

1.1.2.3 故障诊断信息网络化

汽车是机电一体化的高科技产品,新车型、新功能层出不穷。在汽车故障诊断时,专业人员对各种车型的技术资料掌握有限。通过汽车检测维修专业网络,可以传递诊断维修信息,彻底打破信息传递在时空上的局限性,实现资源共享,而且能在线得到诊断专家系统的指导。

1.1.3 发展趋势

高科技的发展,信息化的网络,使得汽车故障诊断技术必将向着智能化、集成化方向发展。

1.1.3.1 基于神经网络的故障诊断专家系统

神经网络具有较好的容错性,较强的自学习功能、自适应能力,大规模并行处理能力等。把神经网络应用于诊断专家系统是新一类知识表达体系,在知识获取、并行推理等方面有明显的优越性,解决了传统专家系统在知识获取上的瓶颈问题,提高了诊断系统的智能水平。

1.1.3.2 基于网络的集成故障诊断专家系统

由于汽车故障诊断实例丰富、诊断信息量大,不确定因素多,因此,探索适合汽车领域的专家系统,集成规则、案例、模糊和神经网络理论,集成推理机制,以网络为框架,以多媒体技术为载体,研究多种诊断模型融合技术必将是发展方向。

集成故障诊断专家系统能自动选择合适的诊断模型,灵活处理诊断知识和应用推理方式,满足内在机理上的融合,避免诊断的冗余问题。

多媒体技术集图形、音像、文本于一体，使诊断系统具有良好的人机界面和交互环境，增加了系统的可靠性，提高了诊断的效率。通过局域网、因特网实现异地诊断和在线诊断，达到多个专家协同诊断、提高诊断准确性的目的，还可以对汽车诊断人员进行远程培训，在多媒体情境中，使诊断技术易懂好学，提高培训成效，保持诊断技术的先进性。

1.1.4 我国汽车诊断技术存在的差距

我国汽车诊断技术正在快速发展，但与国外先进水平相比，还有一定差距，主要突出在以下几个方面：

(1) 管理水平还需进一步提高。我国已基本建立了车辆检测诊断制度，实施了“定期检测、强制维护、视情修理”的汽车维修制度，但我国各地区经济和技术水平不一致，大部分地区尚未进行汽车维修行业的电脑化管理和信息化建设，甚至还有“事后维修”现象。汽车诊断技术的滞后，与高速发展的汽车技术和迅猛增长的汽车保有量严重脱节，这是一个值得重视的问题。

(2) 诊断设备和仪器的国产化研发能力欠佳，而进口诊断设备价格昂贵，阻碍了我国汽车诊断技术的发展。

(3) 汽车维修人员的素质普遍不高。汽车的高科技化、现代检测设备本身的高性能要求维修人员具备一定的汽车专业、机电专业理论知识，懂计算机、会英语，综合职业能力较强，但这种技能型专门人才紧缺。

综上所述，汽车技术的高科技，对汽车故障诊断技术提出了很高的要求。智能化、集成化的现代汽车故障诊断技术必将成为汽车检测维修领域的发展方向。

1.2 故障自诊断系统的组成与功能

顾名思义，故障自诊断就是电子控制系统自己监测运行情况，诊断系统有无故障。

1.2.1 故障自诊断系统的组成

汽车故障自诊断系统主要由传感器监测电路、执行器监测电路、软件程序、故障诊断通信接口（Trouble Diagnostic Communication Link, TDCL）以及各种故障指示灯等组成。传感器与执行器监测电路一般都与各种电控单元设置在同一块印刷电路板上，软件程序存储在各种电控单元内部的专用存储器中。图 1.4-1 所示为发动机冷却液温度传感器的自诊断电路示意图。

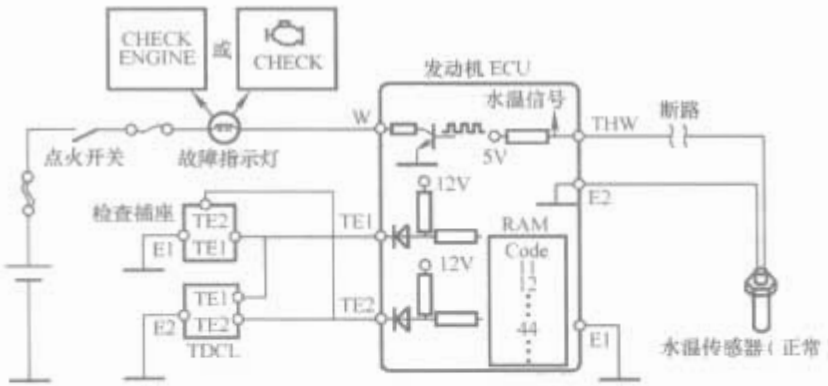


图 1.4-1 温度传感器自诊断电路示意图

故障诊断通信接口通常称为故障诊断插座，装备电子控制系统的汽车上都设有诊断插座，一般安装在熔断器盒上、仪表盘下方或发动机舱内。在发动机电子控制系统中，一般在发动机舱内还设置有一个故障检查插座，其功用与故障诊断插座相同。设置故障检查插座的目的是便于检修人员在发动机舱盖开启状态下，直接利用检查插座来测试发动机电子控制系统有无故障。如果没有检查插座，检修人员就必须进入驾驶室利用故障诊断插座进行测试。

1.2.2 故障自诊断系统的功能

在汽车运行过程中，各种 ECU 根据不同传感器和控制开关输入的信号，按照预先设定的控制程序进行数学计算和逻辑判断，并向各种执行器发出相应的控制指令完成不同的控制功能。如果某只传感器或控制开关发生故障，就不能向 ECU 输送正常信号，汽车性能就会变坏甚至无法运行。如果执行机构发生故障，那么，其监测电路反馈给 ECU 的信号就会出现异常，汽车性能也会变坏甚至无法运行。因此在使用汽车时，一旦接通点火开关，自诊断电路就会投入工作，实时监测各种传感器、控制开关和执行器的工作状态。一旦发现某只传感器或控制开关信号异常，或执行机构监测电路反馈的信号异常，就会立即采取相应措施。

自诊断系统的功能包括三个方面：①监测控制系统工作情况，一旦发现某只传感器或执行器参数异常，就立即发出报警信号；②将故障内容编成代码（称为故障代码）存储在随机存储器 RAM 中，以便维修时调用或供设计参考；③启用相应的备用功能，使控制系统处于应急状态运行。

1.2.2.1 发出报警信号

在电子控制系统运转过程中，当某只传感器、控制开关或执行器发生故障时，ECU 将立即接通仪表盘上的故障指示灯电路，使指示灯发亮或闪亮，如图 1.4-1 所示。目的是提醒驾驶员控制系统出现故障，应立即检修或送修理厂修理，以免故障范围扩大。

各种电子控制系统的故障指示灯均设置在组合仪表盘的透明面膜下面，并在面膜上印制有不同的英文字母或缩写字母或相应的图案。例如，发动机电子控制系统的故障指示灯用检查发动机“CHECK ENGINE”或立即维修发动机“SERVICE ENGINE SOON”表示，防抱死制动系统用“ABS”表示，安全气囊系统用“SRS”或“AIR BAG”表示等。

1.2.2.2 存储故障代码

当自诊断系统发现某只传感器、控制开关或执行器发生故障时，其 ECU 会将监测到的故障内容以故障代码的形式存储在随机存储器 RAM 中。只要存储器电源不被切断，故障代码就会一直保存在 RAM 中。即使是汽车在运行中偶尔出现一次故障，自诊断电路也会及时检测到并记录下来。在每一辆汽车的自诊断系统电路中，都设置有一个专用的故障诊断插座（1994 年以后均为 16 端子插座），当诊断排除故障或需要了解电子控制系统的运行参数时，使用制造厂商提供的专用故障检测仪或通过特定的操作方法，就可通过故障诊断插座将存储器中的故障代码和有关参数读出，为查找故障部位、了解系统运行情况和改进控制系统的设计提供依据。

1.2.2.3 启用备用功能

备用功能又称为失效保护功能。当自诊断系统发现某只传感器、控制开关或执行器发生故障时，其 ECU 将以预先设定的参数取代故障传感器、控制开关或执行器工作，使控制系统继续维持控制功能，汽车将进入故障应急状态运行并维持基本的行驶能力，以便将汽车行驶到修理厂修理。电子控制系统的这种功能称为备用功能或失效保护功能。下面分别以发动机电子控制系统的备用功能和电子控制自动变速系统的失效保护功能为例说明。

(1) 发动机电子控制系统的备用功能。当发动机电子控制系统在备用功能工作状态下，由于发动机的性能将受到不同程度的影响。因此，某些车型的发动机自诊断系统还将自动切断空调、音响等辅助电气系统电路，以便减小发动机的

工作负荷。汽车发动机电子控制系统的备用功能主要包括以下几个方面：

1) 冷却液温度传感器电路断路或短路时，ECU 按固定温度值控制喷油器喷油。当冷却液温度传感器工作正常时，冷却液温度一般设定在 $(-30\sim+120)^{\circ}\text{C}$ ，其输出信号电压在 $0.3\sim 4.7\text{V}$ 范围内变化，如图 1.4-2 所示。当冷却液温度传感器电路发生短路或断路故障时，其输出的信号电压就会低于 0.3V 或高于 4.7V ，ECU 接收到低于 0.3V 或高于 4.7V 的冷却液温度信号时，自诊断系统就会判定冷却液温度传感器及其电路有短路或断路故障，并立即启用备用功能，按固定温度值控制喷油器喷油。如桑塔纳 2000GSI，捷达 GT、GTX 型轿车的冷却液温度传感器或其电路发生断路故障时，ECU 一方面控制接通故障指示灯电路使指示灯发亮报警，另一方面将按冷却液温度为 80°C 的工作状态控制喷油器喷油，并将故障内容编成代码存储在随机存储器 RAM 中，以便检测维修时调用。当冷却液温度传感器或其电路发生短路故障时，ECU 一方面控制接通故障指示灯电路使指示灯发亮报警，另一方面将按冷却液温度为 19.5°C 的工作状态控制喷油器喷油，并将故障内容编成代码存储在随机存储器 RAM 中，以便检测维修时调用。

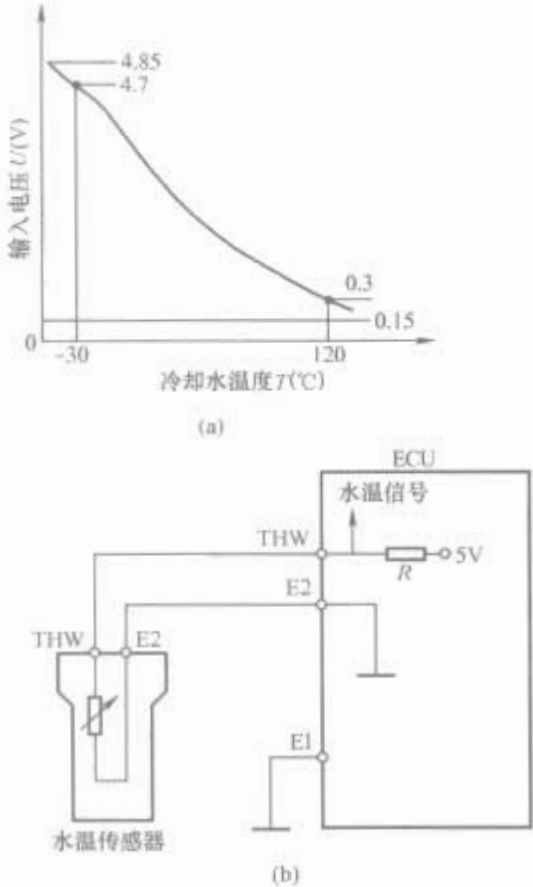


图 1.4-2 冷却液温度传感器 CTS 自诊断电路
(a) CTS 输出特性；(b) CTS 工作电路

- 2) 当进气温度传感器或其电路断路或短路时，ECU 将按进气温度为 20°C 的工作状态控制喷油器喷油。
- 3) 当空气流量传感器或歧管压力传感器电路断路或短路时，ECU 将按节气门位置传感器信号以三种固定的喷油量控制喷油器喷油。当节气门位置传感器（桑塔纳 2000GSI，捷达 GT、GTX 型轿车为节气门控制组件）的怠速触点闭合时，以固定的怠速喷油量控制喷油；当怠速触点断开、节气门尚未全开时，以固定的小负荷喷油量控制喷油；当节气门全开或接近全开时，以固定的大负荷喷油量控制喷油。
- 4) 当节气门位置传感器电路断路或短路时，ECU 将根据发动机转速信号和空气流量传感器信号计算出一个替代值来控制喷油器喷油。

- 5) 当大气压力传感器电路断路或短路时，ECU 将按 101kPa （1 个标准大气压力）控制喷油器喷油。
- 6) 当氧传感器电路断路、短路、输出信号电压保持不变或每 10min 变化低于 8 次时，ECU 将取消空燃比反馈控制，并以开环控制方式控制喷油器喷油。
- 7) 当曲轴位置传感器电路断路或短路时，由于 ECU 接收不到曲轴转速与转角信号，因此无法控制点火时刻和喷油时刻，即不能实施失效保护，发动机将无法运转。
- 8) 当执行器（如喷油器、点火控制器、怠速控制阀等）出现故障时，有的故障能被 ECU 检测出来，有的则不能检测，具体情况依车型的控制软件和硬件设计而异。例如，当桑塔纳 2000GSI，捷达 GT、GTX 型轿车节气门控制组件内的怠速节气门电位计信号中断时，控制组件将利用应急弹簧将节气门拉开到规定开度，使怠速转速升高而进入应急状态运行。

监控执行器故障一般都设有专用监测电路，监测点火器的自诊断电路如图 1.4-3 所示。当发动机转速变化时，ECU 发出与转速同步变化的点火脉冲控制指令，点火控制器内部功率管导通与截止的频率随发动机转速变化而同步变化，点火监控电路将从功率管的集电极接收到高、低电平且交替变化的同步信号。

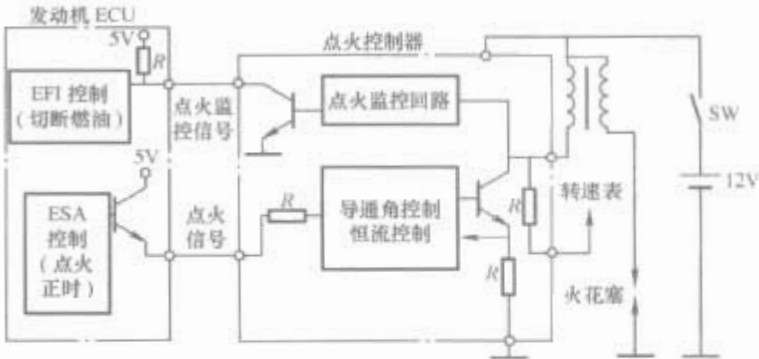


图 1.4-3 点火器故障自诊断电路

当发动机运转而点火线圈初级电路一直接通或一直断开时，监控电路就接收不到交替变化的信号，反馈到 ECU 的监控信号将保持高电平或低电平不变。当 ECU 连续发出 6 个点火脉冲控制指令而点火监控反馈信号仍保持不变时，ECU 就会判定点火系统发生故障，立即发出控制指令使喷油器停止喷油，并将故障内容编成代码存储在随机存储器 RAM 中，以便检测维修时调用。

(2) 电子控制自动变速系统的失效保护功能。在电子控制自动变速系统 (ECT) 中，车速传感器和电磁阀是 ECT 的 ECU 的重要部件。当电磁阀或车速传感器及其电路出现故障时，ECT 的 ECU 将利用其备用功能，配合换挡操纵手柄和手控阀工作，使汽车继续行驶到维修站进行维修，此功能称为失效保护功能。

1) 电磁阀及其失效保护控制。在丰田系列汽车 ECT 中，当 No. 1、No. 2 电磁阀正常时，ECT 的 ECU 通过控制 No. 1 和 No. 2 电磁阀通电或断电，即可控制换挡阀切换换挡元件油路，使变速器从一档升挡到 O/D 挡或从 O/D 挡降挡到一档。

当 No. 1、No. 2 电磁阀中的某一只电磁阀电路发生短路或断路故障时，ECT 的 ECU 仍能继续控制另一只电磁阀通电或断电，使变速器进行部分挡位变换。电磁阀的失效保护功能见表 1.4-1。如果 No. 1 电磁阀电路发生短路或断路，ECT 的 ECU 将继续控制 No. 2 电磁阀通电或断电，使变速器按表 1.4-1 中“ No. 1 电磁阀故障”时所示的挡位换挡；如果 No. 2 电磁阀电路发生短路或断路，ECT 的 ECU 将继续

续控制 No. 1 电磁阀通电或断电，使变速器按表 1.4-1 中“**No. 2 电磁阀故障**”时所示的挡位换挡；如果 No. 1 和 No. 2 电磁阀都发生故障，则电子控制系统不能控制换挡，此时只能由手动操纵换挡。手动换挡时，选挡操纵手柄将操纵手控阀按表 1.4-1 中“**No. 1、No. 2 电磁阀故障**”时所示的挡位换挡。当电磁阀或其电路故障时，由表 1.4-1 可见，

多数排挡都比电磁阀正常时偏高。例如，当两只电磁阀都发生故障时，如果选挡操纵手柄拨到“D”位，排挡则为 O/D 挡；如果拨到“2（或 S）”位，排挡则为三挡。因为排挡越高，传动比越小，车速越快，所以在使用中，必须根据行驶条件慎重选择选挡操纵手柄位置，以免车速过高而导致发生事故。

表 1.4-1 ECT No. 1、No. 2 换挡电磁阀失效保护功能表

挡 位	正常状态		No. 1 电磁阀故障				No. 2 电磁阀故障			No. 1、No. 2 电磁阀故障	
	传动挡位	电磁阀		电磁阀		传动挡位	电磁阀		传动挡位	手动操纵时换挡执行元件的排挡	
		No. 1	No. 2	No. 1	No. 2		No. 1	No. 2			
D	一档	通电	断电	失效	通电	三挡	通电	失效	一档	O/D 挡	
	二挡	通电	通电	失效	通电	三挡	断电	失效	O/D 挡	O/D 挡	
	三挡	断电	通电	失效	通电	三挡	断电	失效	O/D 挡	O/D 挡	
	O/D 挡	断电	断电	失效	断电	O/D 挡	断电	失效	O/D 挡	O/D 挡	
2 或 S	一档	通电	断电	失效	通电	三挡	通电	失效	一档	三挡	
	二挡	通电	通电	失效	通电	三挡	断电	失效	三挡	三挡	
	三挡	断电	通电	失效	通电	三挡	断电	失效	三挡	三挡	
L	一档	通电	断电	失效	断电	一档	通电	失效	一档	一档	
	二挡	通电	通电	失效	通电	二挡	通电	失效	一档	一档	

2) 车速传感器失效保护控制。在 No. 1 和 No. 2 车速传感器中，No. 1 车速传感器为备用传感器。当 No. 1、No. 2 车速传感器正常时，ECT 的 ECU 只利用 No. 2 车速传感器信号控制换挡；当 No. 2 车速传感器或其电路发生故障时，ECT 的 ECU 将利用 No. 1 车速传感器信号控制变速器换挡和变矩器锁止；当 No. 1 和 No. 2 车速传感器都发生故障时，ECT 的 ECU 将无法进行控制，汽车只能在一挡行驶而无其他挡位；ECT 的 ECU 既不会使 O/DOFF 指示灯闪亮报警，也不会存储任何故障代码。

1.3 故障自诊断系统的诊断原理

在电子控制系统工作过程中，自诊断电路随时都在监测各种传感器、控制开关和执行器的工作状况，诊断传感器、控制开关和执行器及其电路是否发生故障。

在一般情况下，自诊断系统能够识别出故障类型，如无信号（断路）、对地短路（搭铁）、对正极短路等。但是，由于控制部件的结构、线路连接以及故障原因各有不同，因此，某些类型的故障自诊断系统难以区别出来。下面分别以自诊断监测点位于被监测部件正极的自诊断和监测点位于被监测部件负极的自诊断测试情况为例说明。

1.3.1 监测点位于被监测部件正极的自诊断

在汽车电子控制系统中，各种传感器的故障自诊断监测点一般都位于传感器的正极。

1.3.1.1 搭铁和对负极短路故障的自诊断

当监测点位于被监测部件正极时，传感器搭铁或对负极短路故障的自诊断电路如图 1.4-4 所示。

当传感器及控制系统正常时，自诊断电路从自诊断监测点测得传感器输入中央处理单元 CPU 的信号电压为 0.3~4.7V，表示该传感器工作正常，自诊断结果无故障记录。

如果传感器与 ECU 之间的信号线、连接器插头或传感器部件本身“搭铁”，则自诊断监测点输入 CPU 的检测值将始终为 0V，此时 CPU 记录的故障为：“对地短路”，即搭铁，如图 1.4-4（a）所示。

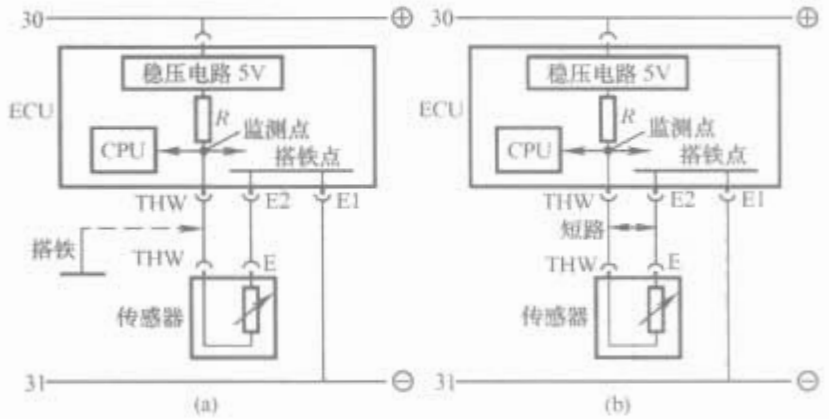


图 1.4-4 传感器线路搭铁或对负极短路故障的自诊断电路

(a) 搭铁的自诊断电路；(b) 对负极短路的自诊断电路

如果传感器信号线与负极导线短接，即“对负极短路”，则自诊断监测点输入 CPU 的检测值也将始终为 0V，此时 CPU 记录的故障也为：“对地短路”，如图 1.4-4（b）所示。

综上所述，在监测点位于被监测部件正极的情况下，当控制部件的信号线、连接器插头或部件本身“搭铁”或“对负极短路”时，CPU 记录的故障为：“对地短路”，即搭铁。

1.3.1.2 断路与对正极短路故障自诊断

当监测点位于被监测部件正极时，断路与对正极短路故障的自诊断电路如图 1.4-5 所示。

当传感器与 ECU 之间的信号线、连接器插头或传感器部件本身断路时，自诊断监测点输入 CPU 的检测值将始终为 5V，如图 1.4-5（a）所示。某些传感器（如节气门位置传感器）需要提供电源，其电源线、信号线及搭铁线等均通过线束插头或插座与 ECU 的线束插座连接。当传感器与 ECU 之间的信号线、线束插头或部件本身“对正极短路”时，自诊断监测点输入 CPU 的电压也将始终保持 5V 不变，如图 1.4-5（b）所示。

由此可见，当传感器发生“断路”和“对正极短路”两种类型的故障时，因为自诊断监测点输入 CPU 的检测值都始终为 5V，所以 CPU 难以区分其故障类型。因此，在监测

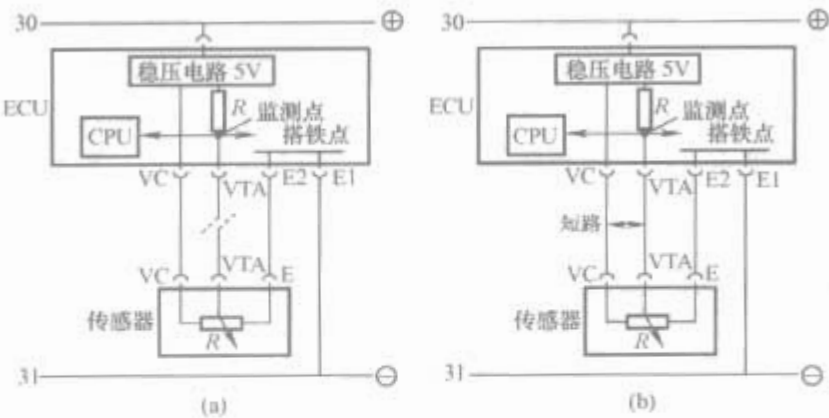


图 1.4-5 传感器线路断路与对正极短路的自诊断电路
(a) 断路的自诊断电路；(b) 对正极短路的自诊断电路

点位于被监控部件正极的情况下，当出现“断路”和“对正极短路”两种故障之一时，CPU 自诊断记录的结论将是：“断路或对正极短路”。

1.3.2 监测点位于被监测部件负极的自诊断

在汽车电子控制系统中，各种执行器的故障自诊断监测点一般都设在执行器的负极，以便驱动回路驱动执行器动作。

1.3.2.1 对电源线短路或对正极短路故障的自诊断

当自诊断监测点位于被监测部件负极时，对电源线短路或对正极短路故障的自诊断电路如图 1.4-6 所示。

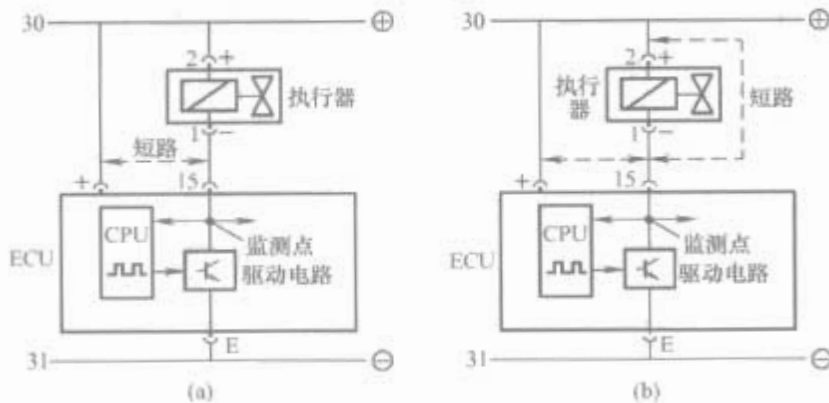


图 1.4-6 执行器对正极短路的自诊断电路
(a) 对电源线短路的自诊断电路；(b) 对正极短路的自诊断电路

当执行器及控制系统正常时，CPU 向输出回路（即驱动电路）发出一定频率的脉冲控制信号驱动执行器动作，自诊断电路从自诊断监测点可以测得交替变化的脉冲信号并反馈到 CPU，从而说明控制系统工作正常，此时 CPU 无故障记录。

当执行器负极导线、连接器插头或部件本身对电源线短路或对部件正极导线短路时，自诊断监测点反馈输入到 CPU 的监测值将始终等于电源电压，如图 1.4-6 所示。因此，CPU 自诊断记录的结论将是：“对正极短路”。

1.3.2.2 断路与搭铁故障自诊断

当自诊断监测点位于被监测部件负极时，断路与搭铁（又称为对地短路）故障的自诊断电路如图 1.4-7 所示。

当执行器负极导线、连接器插头或部件本身与 ECU 之间的导线发生断路故障时，自诊断监测点反馈输入中央处理单元 CPU 的监测值将始终等于 0V，如图 1.4-7 (a) 所示。

当执行器负极导线、插头或部件本身搭铁时，自诊断监测点反馈输入 CPU 的检测值也将始终等于 0V，如图 1.4-7 (b) 所示。

由此可见，当执行器发生“断路”和“搭铁”两种类型的故障时，由于自诊断监测点反馈输入 CPU 的监测值相同，

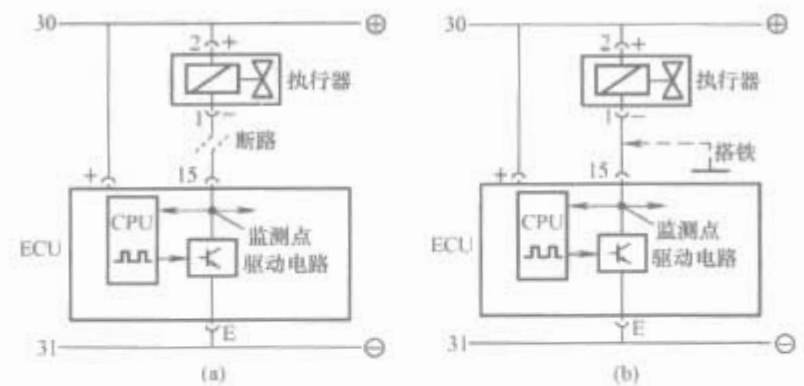


图 1.4-7 执行器断路与搭铁的自诊断电路
(a) 断路的自诊断电路；(b) 搭铁的自诊断电路

因此，CPU 难以区分故障类型。在自诊断监测点位于被监测部件负极的情况下，当出现“断路”和“搭铁”故障之一时，CPU 自诊断记录的结论将是：“断路/对地短路”。

1.4 发动机控制系统故障诊断检修程序与方法

实践证明，汽车电子控制系统故障绝大多数都发生在传感器、执行器、连接器和线束等部件上，ECU 出现故障的可能性很小，汽车行驶 10 万 km 时 ECU 故障约占总故障的 1%。因此，检查排除电子控制系统故障主要是检修零部件、连接器和线束。只有确认所有零部件正常之后，才能判定 ECU 有故障。电控发动机汽车是以电子控制系统为控制核心而工作的。当电控汽车发生故障时，其诊断程序和方法与化油器式发动机汽车有所不同。

1.4.1 发动机电子控制系统故障的诊断与检修程序

实践证明，可按下述程序进行诊断与检修。

(1) 向用户询问有关情况。如故障产生时间、产生条件（包括天气、气温、道路情况以及发动机工况等），故障现象或症状，故障发生频率，是否进行过检修以及检修过哪些部位等。

(2) 进行直观检查。即检查电子控制系统的控制部件是否正常，电气线路连接器或接头有无松动、脱接，导线有无断路、搭铁、错接以及烧焦痕迹；管路有无折断、错接或凹瘪等。部分传感器与执行器对发动机性能的影响见表 1.4-2，熟悉传感器与执行器对发动机以及车辆运行状态的影响，对迅速诊断与排除故障极为重要。

表 1.4-2 汽车电子控制系统控制部件对发动机工作性能的影响		
序号	部件名称	故障现象
1	ECU	①发动机不能起动；②发动机工作失常
2	点火线圈	①发动机不能起动；②无高压火花跳火；③次级电压过低
3	燃油泵继电器	①发动机不能起动；②燃油泵不工作；③喷油器不喷油
4	继电器盒熔丝	发动机不能起动
5	曲轴与凸轮轴位置传感器	①发动机不能起动；②发动机工作不稳定；③怠速不稳；④中途熄火
6	空气流量与歧管压力传感器	①发动机起动困难；②发动机工作失常；③怠速不稳；④油耗增加

续表

序号	部件名称	故障现象
7	进气温度传感器	①发动机工作不良；②怠速不稳；③怠速熄火；④油耗与排放增加；⑤混合气过浓
8	节气门位置传感器	①发动机起动困难；②怠速不稳；③发动机工作不良；④容易熄火
9	爆震传感器	①发动机工作不稳；②加速时爆震；③点火正时不准
10	氧传感器	①发动机工作不良；②怠速不稳；③油耗与排放增加；④混合气过浓
11	冷却液温度传感器	①发动机起动困难；②发动机工作不良；③怠速不稳；④容易熄火
12	喷油器	①发动机不能起动或起动困难；②油耗增加；③怠速不稳；④发动机工作不良
13	怠速控制阀	①发动机起动困难；②怠速不稳或怠速过高；③容易熄火
14	曲轴箱通风阀 (PVC 阀)	①发动机不能起动或起动困难；②怠速不稳或怠速过高；③加速困难；④油耗增加
15	活性炭罐电磁阀	①发动机工作不良；②发动机怠速不稳
16	空调 (A/C) 开关	①发动机不能起动；②发动机怠速不稳；③怠速熄火
17	电动燃油泵	①发动机不能起动或起动困难；②发动机工作不良；③怠速不稳或怠速熄火；④发动机回火

(3) 按基本检查程序进行基本检查。在诊断发动机电子控制系统故障时, 为了尽快确定故障性质与部位, 尽可能少走弯路, 在对汽车进行直观检查后, 可按图 1.4-8 所示程序



图 1.4-8 发动机电子控制系统故障基本检查程序框图

进行基本检查, 包括怠速检查调整与点火正时的检查调整。

(4) 进行自诊断测试读取故障代码。如有故障代码, 则按故障代码表指示的故障原因和部位逐一排除故障; 如无故障代码但故障症状依然存在, 则通过故障征兆模拟试验来判断试验线路或部件工作是否正常, 同时参照“故障征兆表”进行诊断检查, 以便缩小故障范围。

(5) 如按上述程序诊断检修仍不能排除故障, 说明发动机可能有机械故障和其他故障, 可按“发动机机械故障与其他故障征兆表”进行诊断与排除。

1.4.2 发动机电子控制系统故障的诊断与检修方法

诊断检修发动机电子控制系统故障时, 常用以下几种故障征兆模拟试验方法进行:

(1) 振动试验法。当振动可能是导致产生故障的主要原因时, 就可利用振动法进行检验。试验方法主要包括: 在水平和垂直方向轻轻摆动连接器、线束、导线接头; 用手轻轻拍打传感器、执行器、继电器和开关等控制部件 (注意继电器不能用力拍打, 以免产生误动作)。

(2) 加热试验法。当汽车故障是在热机出现或是由某些传感器与零部件受热所致时, 可用电加热吹风机等加热工具对可能引起故障的零部件或传感器进行适当加热, 以检查其是否有此故障 (注意加热温度不得超过 60℃, 且不能对 ECU 进行加热)。

(3) 水淋试验法。当故障在雨天或湿度较大的条件下产生时, 可通过喷淋试验检查诊断故障。试验时, 将水喷洒在散热器前面和汽车顶部, 间接改变温度和湿度检查其是否发生故障 (注意不能将水直接喷洒在电气与电子控制系统零部件上, 以免造成短路和其他故障)。

1.4.3 发动机电子控制系统的“故障征兆表”

在诊断排除燃油喷射式发动机汽车故障时, 如果经过故障自诊断测试并按测试得到的故障代码不能排除故障, 则可根据车型《维修手册》提供的“D”型或“L”型燃油喷射系统 (EFI) “故障征兆表”并按所列编号由小到大的顺序进行检查。如仍不能排除故障, 可继续按“机械故障和其他故障征兆表”中所列编号顺序进行检查排除。

1.5 故障自诊断测试方式与内容

自诊断测试是指利用专用故障检测仪与车载 ECU 进行通信, 或按照特定的操作方式触发车载 ECU 的控制程序运行, 以便读取故障代码、清除故障代码、读取车载 ECU 内部的控制参数、检测各种传感器和执行器的工作状态及其控制电路是否正常等。

1.5.1 自诊断测试方式

汽车各种电子控制系统有无故障, 可以通过自诊断测试进行诊断。根据发动机工作状态不同, 自诊断测试方式分为静态测试 (Key ON Engine OFF, KOEO) 和动态测试 (Key ON Engine Run, KOER) 两种。

(1) 静态测试。即在点火开关接通 (ON)、发动机不运转 (OFF) 的情况下进行诊断测试, 主要用于读取或清除故障代码。

(2) 动态测试。即在点火开关接通 (ON)、发动机运转 (Run) 的情况下进行诊断测试, 主要用于读取或清除故障代码、检测传感器或执行器工作情况及其控制电路是否良好以及与车载 ECU 进行数据通信等。

1.5.2 自诊断测试内容

故障自诊断测试内容主要包括读取故障代码、读取车载

电控单元内部的控制参数、检测各种执行器的工作状态及其控制电路是否正常。

1.5.2.1 读取故障代码

读取故障代码是诊断汽车电子控制系统故障最常用的自诊断测试方法。汽车在使用过程中，只要蓄电池正极柱和负极柱上的电缆端子未曾拆下，ECU 中存储的故障代码就能长期保存。将故障代码从 ECU 中读出，即可知道故障部位或故障原因，为诊断排除故障提供依据。读取故障代码的方法有两种：利用故障检测仪读取和利用特定的操作方法读取。

1.5.2.2 数据传输

当发动机运转时，利用故障检测仪将车载 ECU 内部的控制参数和计算结果等数值以数据表和串行输出方式在检测仪屏幕上一一显示出来的过程，称为数据传输，通常称为“数据通信”或“读取数据流”。

通过数据传输，各种传感器输出信号电压的瞬时值、ECU 内部的计算与判断结果、各执行器的控制信号都能一目了然的显示在检测仪屏幕上。根据发动机运转状态和传输数据的变化情况，即可判断控制系统工作是否正常，将特定工况下的传输数据与标准数据进行比较，就能准确判断故障类型和故障部位。

1.5.2.3 监控执行器

在发动机熄火状态下或运转过程中，通过故障检测仪向执行器发出强制驱动或强制停止指令来监测执行器动作情况，用以判定执行器及其控制电路有无故障。例如在发动机熄火状态下，控制电动燃油泵运转、控制某只电磁阀或继电器（如冷却风扇继电器、空调压缩机继电器等）工作、控制某只喷油器喷油等，当发出相应的控制指令后，如燃油泵不转（听不到运转声音）、电磁阀不工作（用手触摸时没有振动感）、冷却风扇或空调压缩机不转动，说明该执行器或其控制电路有故障。

在发动机运转状态下，如果发出控制某只喷油器停止喷油的指令后，用手触摸该喷油器仍有振动感或发动机转速不降低，说明其控制电路有故障；当控制模式设定为闭环控制模式时，系统将对空燃比 A/F 实施闭环控制，氧传感器信号将发挥作用，如果检测仪屏幕上表示发动机混合气浓度的红色指示灯（混合气浓）与绿色指示灯（混合气稀）交替闪亮，说明闭环控制系统正常，如果红色指示灯常亮不闪或绿色指示灯常亮不闪，说明氧传感器失效。

1.6 故障自诊断测试工具

汽车电子控制系统的自诊断测试工具有故障检测仪、调码器和跨接线。

1.6.1 故障检测仪

为了便于维修人员诊断测试汽车电子控制系统故障，汽车制造公司或厂家都为自己生产的汽车设计有专用故障检测仪。

故障检测仪又称为故障诊断测试仪、故障阅读仪、汽车系统测试仪或解码器等。

常用国外故障检测仪有美国 SNAP-ON 公司生产的汽车故障扫描器 Scanner、美国 IAE 公司生产的汽车故障监测器（Owatonna Tool Company Monitor）、通用公司生产的 Tech-I、福特汽车装备的超级星型自诊断测试自动显示器 SUPERSTAR II（Self Test Automatic Readout）、克莱斯勒（Chrysler）公司汽车配用的 DRB II、DRB III 型诊断显示器（Diagnostic Readout Box）等。常用国产故障检测仪主要有

V. A. G1551 故障阅读仪、V. A. G1552 汽车系统测试仪、电眼睛和修车王等。

同一种故障检测仪配备有多种车型的自诊断软件，购买检测仪时可根据需要选购。由于不同车型的自诊断软件不尽相同，因此，某一种自诊断测试软件仅适用于指定车型的诊断测试，对其他厂家或公司的车型不能使用。故障阅读器 V. A. G1551 的结构如图 1.4-9 所示。

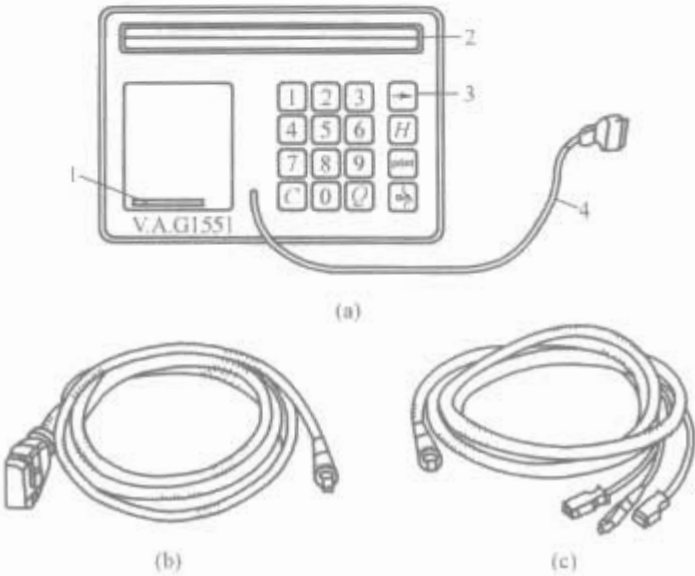


图 1.4-9 故障阅读器 V. A. G1551 与测试线束
(a) V. A. G1551 型故障阅读器；(b) 16 端子测试线束 V. A. G1551/3；(c) 2 端子测试线束 V. A. G1551/1
1—打印纸输出口；2—显示屏；3—输入键盘；4—测试线束

故障诊断仪主要由显示屏、键盘、打印机、测试线束插孔、程序卡安装槽（位于仪器后上部）和交叉线束连接插孔（位于仪器背面）组成。其中，16 端子测试线束适用于具有 16 端子诊断插座的汽车，如桑塔纳 GLi、2000GLi、2000GSi 型轿车；2 端子测试线束适用于具有 2 端子诊断插座的汽车，如奥迪轿车。不同年份生产的车型，配有不同的磁卡，将其插入相应的故障测试仪，即可对不同的车型进行诊断测试。

汽车故障检测仪不仅可以检测诊断燃油喷射系统故障，而且还能检测诊断防抱死制动系统、安全气囊系统、自动变速系统等各种电子控制系统的故障。故障测试仪型号不同，使用方法也不相同。因此，使用故障测试仪时，必须按照不同测试仪的使用说明进行操作。

1.6.2 调码器

汽车故障检测仪功能齐全、使用方便，但价格昂贵。为了便于没有故障检测仪的用户通过读取故障代码来诊断故障，大多数车型设计有利用调码器或跨接线来读取故障代码的程序。

调码器是由发光二极管与一定阻值的电阻串联组成的显示器，如图 1.4-10 所示。将调码器与诊断插座上相应端的子连接，即可根据调码器上发光二极管的闪烁情况读取故障代码。

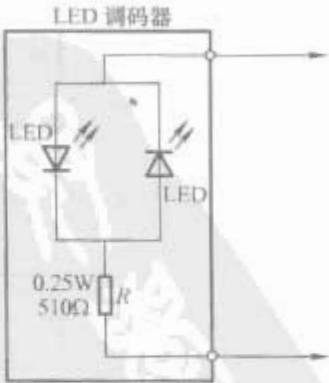


图 1.4-10 LED 调码器电路

1.6.3 跨接线

跨接线是一根普通的单芯导线或两端带有鳄鱼夹的导线，如图 1.4-11 所示。将跨接线与诊断插座上相应的接线端子连接之后，接通点火开关即可根据组合仪表盘上故障指

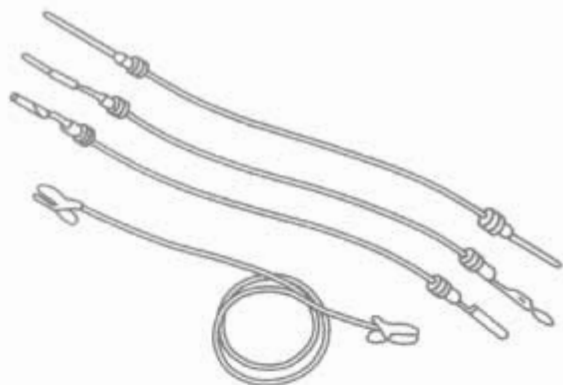


图 1.4-11 跨接线

示灯的闪烁情况读取故障代码。

1.7 故障自诊断测试方法

汽车电子控制系统都具有故障自诊断测试功能，利用专用仪器或专用工具，通过自诊断测试，根据测试过程中显示的故障代码来检查排除各种电子控制系统的故障，是排除汽车电子控制系统故障最有效、最方便和最快捷的方法。

将故障检测仪、调码器或跨接线等自诊断测试工具与汽车上的诊断插座连接后，接通点火开关，即可触发自诊断系统进行自诊断测试。利用故障检测仪进行自诊断测试时，其显示屏能够直接显示故障内容与故障原因。利用调码器或跨接线进行自诊断测试时，只能通过调码器或组合仪表盘上不同控制系统的故障指示灯读取故障代码。根据读取的故障代码，并查阅被测车型的《维修手册》，就可知道故障代码表示的故障内容与故障原因。

2 电子控制主动安全系统

汽车装备的安全装置分为主动安全装置和被动安全装置两大类。主动安全装置的功用是避免发生事故，采用的主要有车轮制动器、电子控制防抱死制动系统、电子控制制动力分配系统、驱动轮防滑转控制系统（牵引力控制系统 TCS）、车辆稳定性控制系统、挡风玻璃刮水器与洗涤器、前照灯控制系统、转向灯光与音响信号报警系统、雷达车距控制与报警系统等。被动安全装置的功用是减轻事故导致的伤害程度，采用的主要有安全气囊控制系统和座椅安全带控制系统、座椅安全带、护膝垫、两节或三节式转向柱等。

2.1 防抱死制动的基本原理

防抱死制动系统的英文名称是 Anti-lock Braking System（防锁死制动系统）或 Anti-skid Braking System（防滑移制动系统），缩写为 ABS。

由汽车理论可知，当制动器制动力大于轮胎—道路附着力（简称附着力）时，车轮就会抱死滑移。只有汽车具有足够的制动器制动力，同时地面又能提供较大的附着力时，汽车才能获得较好的制动效果。

在汽车制动时，除车轮旋转平面的纵向附着力外，还有垂直于车轮旋转平面的横向附着力。在汽车制动过程中，纵向附着力决定汽车纵向运动，影响汽车的制动距离；横向附着力则决定汽车的横向运动，影响汽车的方向稳定性和转向控制能力。

电子控制防抱死制动系统的功用：在汽车制动过程中，自动调节车轮的制动力，防止车轮抱死滑移，从而获得最佳制动性能（缩短制动距离、提高方向稳定性、增强转向控制能力），减少交通事故。

2.1.1 车轮滑移率 S 及其影响因素

当汽车匀速行驶时，实际车速 v （即车轮中心的纵向速

度）与车轮速度 v_w （即车轮滚动的圆周速度）相等，车轮在路面上的运动为纯滚动运动，如图 1.4-12（a）所示。然而，在汽车实际运行过程中，当驾驶员踩下制动踏板后，在制动器摩擦力矩的作用下，车轮的角速度减小，实际车速与车轮速度之间就会产生一个速度差，轮胎与地面之间就会产生相对滑移，如图 1.4-12（b）所示。



图 1.4-12 制动车轮受力分析
(a) 车轮滚动运动；(b) 车轮抱死滑移

轮胎滑移的程度用滑移率 S 来表示。车轮滑移率是指实际车速 v 与车轮速度 v_w 之差同实际车速 v 的比率，其表达式为

$$S = \left(\frac{v - v_w}{v} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{v_w}{v} \right) \times 100\% \\ = \left(1 - \frac{r\omega}{v} \right) \times 100\%$$

式中： S 为车轮滑移率； v 为车速（车轮中心纵向速度）， m/s ； v_w 为车轮速度（车轮瞬时圆周速度）， $v_w = r\omega$ ， m/s ； r 为车轮半径， m ； ω 为车轮转动角速度， rad/s 。

当 $v = v_w$ 时，滑移率 $S = 0$ ，车轮自由滚动。

当 $v_w = 0$ 时，滑移率 $S = 100\%$ ，车轮完全抱死滑移。

当 $v > v_w$ 时，滑移率 $0 < S < 100\%$ ，车轮既滚动又滑移。滑移率越大，车轮滑移程度越大。

在制动过程中，车轮抱死滑移的根本原因是制动器制动力大于轮胎—道路附着力。因此，影响车轮滑移率的因素包括以下几个方面：①汽车载客人数量或载物量；②前、后轴的载荷分布情况；③轮胎种类及轮胎与道路的附着状况；④路面种类和路面状况；⑤制动力大小及其增长速率。

2.1.2 车轮滑移率 S 与附着系数 ϕ 的关系

汽车纵向附着系数和侧向附着系数对滑移率有很大影响。试验证明，在地面附着条件差（例如在冰雪路面上制动）的情况下，由于轮胎—道路附着力很小使可以得到的最大地面制动力减小，因此，在制动踏板力（或制动分泵压力）很小时，地面制动力就会达到最大附着力，车轮就会抱死滑移。附着系数与滑移率之间的关系如图 1.4-13 所示。

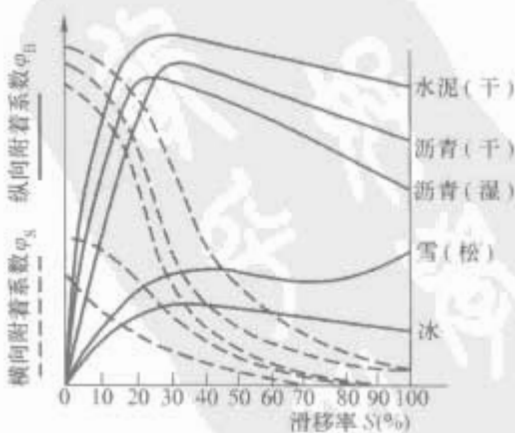


图 1.4-13 附着系数与滑移率的关系
(虚线与实线标注的上下顺序——对应)

由图 1.4-13 可见：

(1) 附着系数取决于路面性质。一般说来，干燥路面附

着系数大，潮湿路面附着系数小，冰雪路面附着系数更小。

(2) 在各种路面上，附着系数都随滑移率的变化而变化。

(3) 在各种路面上，当滑移率为 20% 左右时，纵向附着系数最大，制动效果最好。

纵向附着系数最大时的滑移率称为理想滑移率或最佳滑移率。当滑移率超过理想滑移率时，纵向附着系数减小，产生的地面制动力随之下降，制动距离将增长。滑移率大于理想滑移率后的区域称为非稳定制动区域或非稳定区，如图 1.4-14 所示。

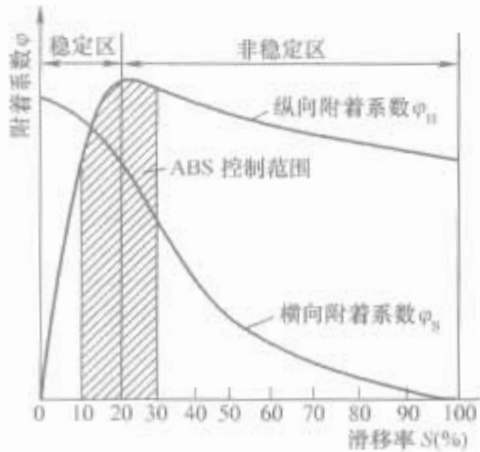


图 1.4-14 干燥硬实路面上附着系数与滑移率的关系

横向附着系数是研究汽车行驶稳定性的重要指标之一。横向附着系数越大，汽车制动时的方向稳定性和保持转向控制的能力越强。当滑移率为零时，横向附着系数最大；随着滑移率的增加，横向附着系数逐渐减小。当车轮抱死时，横向附着系数接近于零，汽车将失去方向稳定性和转向控制能力，其危害极大。如果前轮抱死，虽然汽车能沿直线向前行驶，但是失去转向控制能力。由于前轮维持转弯运动能力的横向附着力丧失，因此汽车仍将按原行驶方向滑行，可能冲入其他车道与车辆相撞或冲出路面与障碍物相撞而发生恶性交通事故。如果后轮抱死，汽车的制动稳定性就会变差，抵抗横向外力的能力很弱，后轮稍有外力（如侧向风力或地面障碍物阻力）作用就会发生侧滑（甩尾），甚至出现调头（即突然出现 180° 转弯）等危险现象。

综上所述，为了获得最佳制动性能，应将车轮滑移率控制在 10%~30% 范围内。采用电子控制防抱死制动系统即可达到这一目的。

2.2 防抱死制动系统的组成

2.2.1 防抱死制动系统的组成

防抱死制动系统（ABS）是由电子控制系统和液压控制系统两个子系统组成，如图 1.4-15 所示。

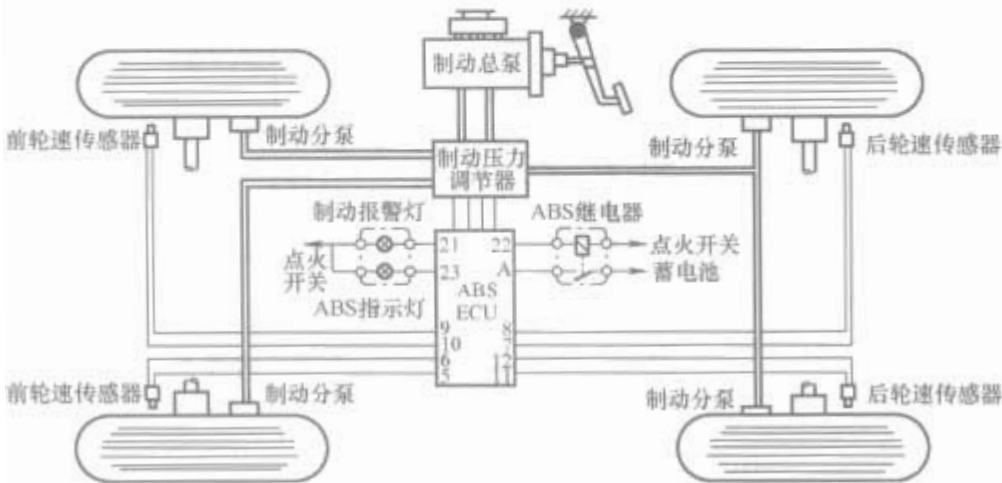


图 1.4-15 防抱死制动系统（ABS）组成简图

电子控制系统由传感器、控制开关、防抱死制动电控单元（ABS ECU）、ABS 指示灯以及制动压力调节器等构成。制动压力调节器既是电子控制系统的执行元件，也是液压控制系统的始控元件。

液压控制系统由常规制动装置和制动压力调节器组成。常规制动装置主要由制动总泵、制动助力器、制动分泵、制动管路和制动器（盘式或鼓式制动器）等组成。制动压力调节器主要由电磁阀、单向阀和回液泵电动机等组成。

各型 ABS 尽管结构型式不尽相同，但都是在常规制动装置的基础上增设传感器、ABS ECU、制动压力调节器和 ABS 指示灯等构成，控制部件的安装位置如图 1.4-16 所示。

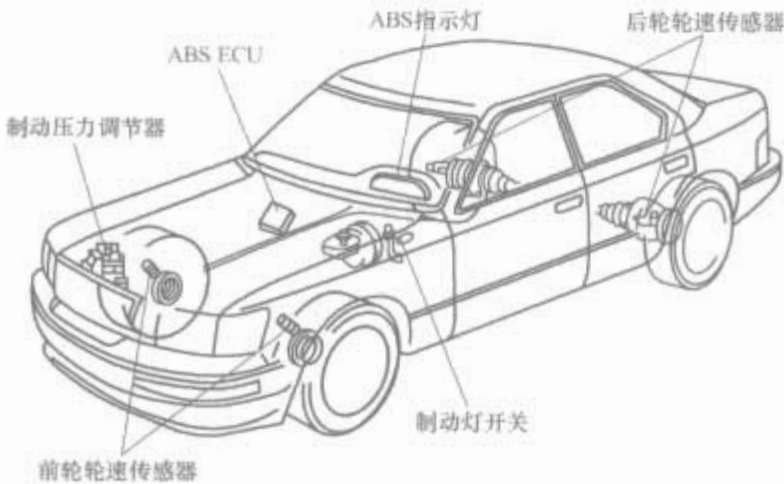


图 1.4-16 ABS 电子控制系统控制部件的安装位置

ABS 采用的传感器有车轮速度传感器和减速度传感器两种。车轮速度传感器又称为车轮转速传感器或轮速传感器，一个 ABS 设有 2~4 只车轮速度传感器，大多数都设有 4 只车轮速度传感器。

车轮速度传感器是 ABS 必需的传感器，其功用是检测车轮的运动状态，将车轮转速变换为电信号输入 ABS ECU。

减速度传感器又分为纵向减速度传感器和横向减速度传感器。减速度传感器仅在控制精度较高的 ABS 中采用，其功用是检测汽车车身的加减速速度，以便 ABS ECU 判别路面状况。

ABS ECU 的主要功用是接收轮速传感器、减速度传感器和开关输入信号，计算汽车的轮速、车速、加减速度和滑移率，并输出控制指令控制制动压力调节器等执行元件工作。

ABS ECU 具有失效保护和故障自诊断功能，一旦发现 ABS 故障时，将终止 ABS 工作，恢复常规制动。与此同时，还将控制 ABS 故障指示灯（或 Anti-lock 故障指示灯）发亮指示，提醒驾驶员及时进行修理。

制动压力调节器是 ABS 的主要执行元件，功用是接受 ECU 的指令，驱动制动压力调节器中的电磁阀动作，同时驱动回液泵电动机转动等，使制动压力升高、保持或降低，从而实现制动压力的自动调节。

2.2.2 防抱死制动系统与常规制动系统的关系

ABS 是在常规制动系统的基础上增设一套电子控制系统构成，控制过程也是在常规制动过程的基础上进行。在制动过程中，当车轮尚未抱死时，制动过程与常规制动完全相同。只有当车轮趋于抱死时，ABS 才对制动压力进行调节。因此，当 ABS 发生故障时，如果常规制动装置正常，那么常规制动系统照样具有制动功能。但是，如果常规制动装置发生故障，那么防抱死制

- (1) 四通道四传感器 ABS (形式 1、2)。
- (2) 三通道四传感器 ABS (形式 3)。
- (3) 三通道三传感器 ABS (形式 4)。
- (4) 两通道三传感器 ABS (形式 5)。
- (5) 两通道两传感器 ABS (形式 6、7)。
- (6) 单通道一传感器 ABS (形式 8)。
- (7) 六通道六传感器 ABS (适用于带挂车的汽车, 图 1.4-17 中未画)。

2.3.4 按控制车轮数量分类

按控制车轮的数量不同, 可分为两轮 ABS 和四轮 ABS。两轮 ABS 只控制两个后轮, 结构简单、价格低廉, 适用于轻型载货汽车和客货两用汽车。四轮 ABS 又分为四通道 ABS 和三通道 ABS。四通道 ABS 的分布形式如图 1.4-17 分布形式 1、2 所示, 三通道 ABS 的分布形式如图 1.4-17 形式

3、4 所示。
除上述分类方法外, 还有其他分类方法, 如按制动压力调节器的动力来源可分为液压式和气压式, 按制动压力调节器调压方式可分为流通式和变容式等。

2.4 防抱死制动电子控制系统

防抱死制动电子控制系统由车轮速度传感器、减速度传感器、各种控制开关、ABS ECU、ABS 指示灯、电磁阀组成的液压控制单元和回液泵电动机等组成。其中, 电磁阀和回液泵电动机既是电子控制系统的执行元件, 也是液压控制系统的始控元件。各型 ABS 的控制电路各不相同, 图 1.4-18 所示为桑塔纳 2000GSI 型轿车 MK20-I 型 ABS 电子控制系统的控制电路。

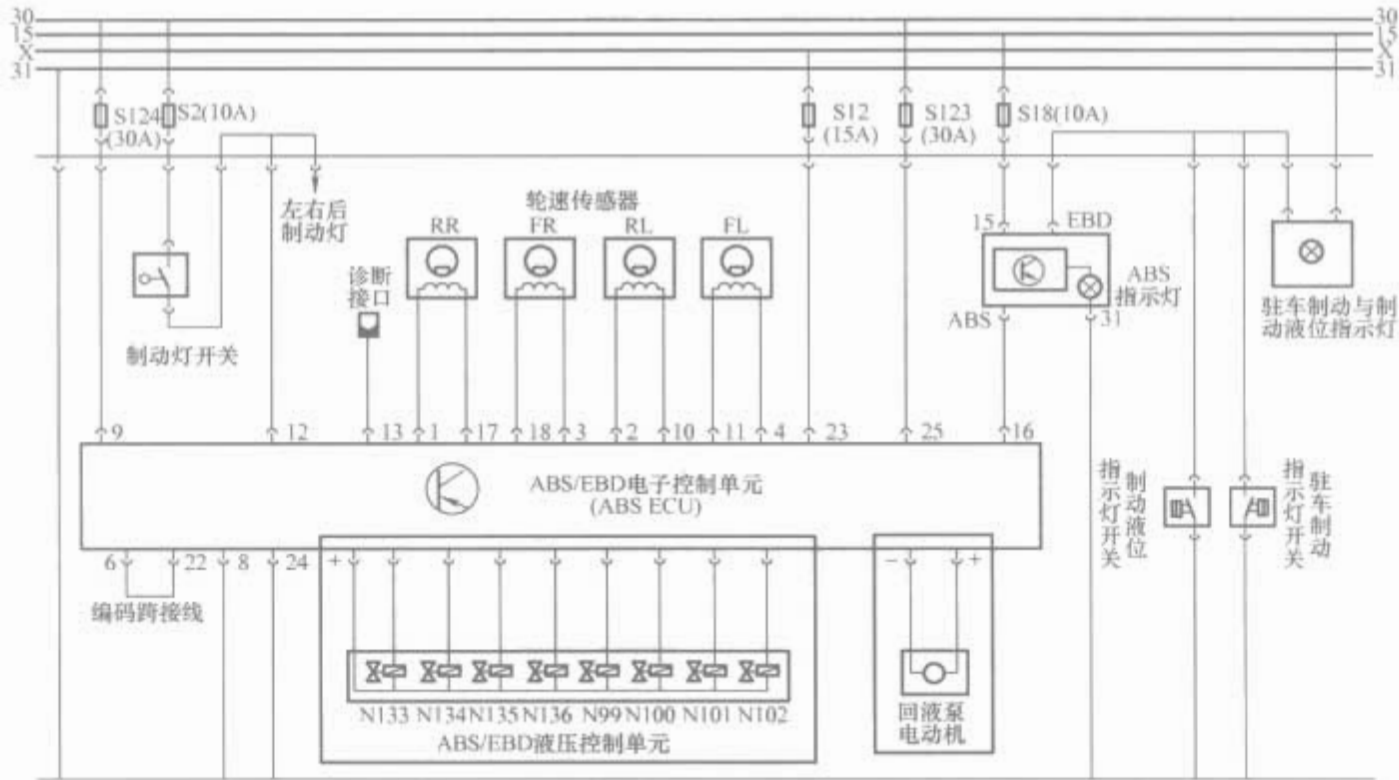


图 1.4-18 MK20-I 型 ABS 电子控制系统控制电路

2.4.1 轮速度传感器

车轮速度传感器简称轮速传感器, 其功用是检测车轮转速, 并转换为电信号输入 ABSECU, 用以计算车轮的圆周速度。

轮速传感器有磁感应式和差动霍尔（效应）式两种, 目前普遍采用磁感应式。

磁感应式轮速传感器由传感元件和信号转子组成。传感元件为静止部件, 由永久磁铁、信号线圈（感应线圈）和线束插头等组成, 安装在车轮附近的静止部件（如转向节、半轴套管、悬架构件等）上, 不随车轮转动。信号转子由铁磁材料制成带齿的圆环, 又称为齿圈转子, 安装在与车轮一同转动的部件（如轮毂、半轴等）上。MK20-I 型 ABS 在 4 只轮速传感器在信号转子的圆周上均制作有 43 个凸齿, 安装位置如图 1.4-19 所示, 前轮速度传感器的传感元件安装在转向节上, 信号转子安装在传动轴上, 随前轮传动轴转动而转动, 如图 1.4-19 (a) 所示。后轮速度传感器的传感元件安装在固定支架上, 信号转子安装在与车轮一同转动的后轮毂上, 如图 1.4-19 (b) 所示。

传感元件与信号转子之间留有一定的间隙, 一般为 0.4~2.0mm。如 MK20-I 型 ABS 前轮传感器间隙为 1.10~1.97mm, 后轮传感器间隙为 0.42~0.80mm; 红旗 CA7220E 型轿车 ABS 前轮传感器间隙为 0.4~0.6mm, 后轮传感器间隙为 0.15~0.85mm。

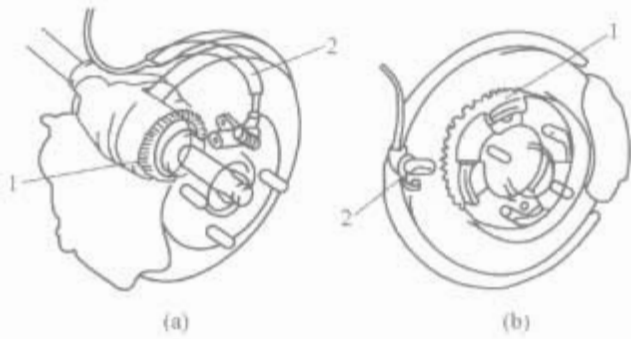


图 1.4-19 MK20-I 型 ABS 轮速传感器安装位置
(a) 安装于转向节; (b) 安装于固定支架
1—信号转子; 2—传感器元件

有些后轮驱动的汽车在主减速器或变速器中安装一个传感器。齿环安装在主减速器输入轴上（有的直接将主减速器齿轮用作信号转子）或变速器输出轴上, 传感器安装在主减速器或变速器壳体上。该传感器检测的是两个后轮的平均速度, 只适用于两后轮一同控制的 ABS。

传感器安装必须牢靠, 否则就会影响传感器正常输出信号或在汽车行驶振动时受到损伤。为了避免灰尘和飞溅的水、泥等影响传感器工作, 安装前应在传感器上涂敷防锈液。

磁感应式轮速传感器的工作原理与其他磁感应式传感器相同, 故不赘述。

2.4.2 速度传感器

减速度传感器又称为加速度传感器，其功用是检测汽车的减速度大小，并转换为电信号输入 ABS ECU，以便判别路面状况并采取相应的控制方式。汽车在高附着系数路面上制动时，减速度很大；在低附着系数路面上制动时，减速度很小，ABS ECU 根据减速度传感器信号即可判断路面状况。例如，当判定汽车是在附着系数很小的冰雪路面上行驶时，就会按照低附着系数路面的控制方式进行控制，以提高制动性能。

减速度传感器按结构不同，可分为光电式、水银式、差动变压器式和半导体式等；按用途不同可分为纵向减速度传感器和横向减（加）速度传感器两种。横向加速度传感器在高级轿车和赛车上采用较多。

减速度传感器安装位置依车而异，有的安装在行李舱内（如丰田赛利卡和佳美轿车），有的安装在发动机舱内。

2.4.2.1 光电式减速度传感器

光电式减速度传感器由两只发光二极管、两只光电三极管、一块透光板和信号处理电路等组成，结构如图 1.4-20 (a) 所示。

光电管是把光能变成电能的器件，内部装有能够产生光电效应的电极，受到光线照射就会向外发射电子，广泛用于无线电传真、自动控制和电影领域。光电管有光电二极管和光电三极管两种。

光电式减速度传感器透光板的作用是透光或遮光。当透光板上的开口位于发光二极管与光电三极管之间时，发光二极管发出的光线能够照射到光电三极管上，使光电三极管导通，如图 1.4-20 (b) 所示。当透光板上的齿扇位于发光二极管与光电三极管之间时，发光二极管发出的光线被透光板上的齿扇挡住而不能照射到光电三极管上，光电三极管处于截止状态，如图 1.4-20 (c) 所示。

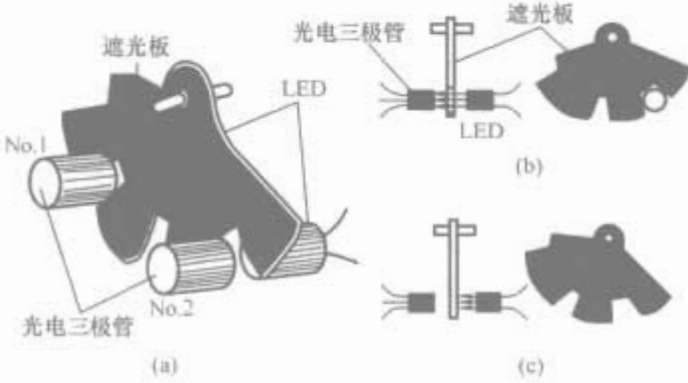


图 1.4-20 光电式减速度传感器结构原理
(a) 元件位置；(b) 透光时；(c) 遮光时

汽车匀速行驶时，透光板静止不动，传感器无信号输出。当汽车减速时，透光板沿汽车纵向摆动，如图 1.4-21 所示。减速度大小不同，透光板摆动角度就不同，两只光电三极管导通与截止状态也就不相同。减速度越大，透光板摆动角度越大。根据两只光电三极管的输出信号，就可将汽车减速度区分为四个等级，见表 1.4-3。ABS ECU 接收到传感器信号后，就可判定出路面状况，从而采取相应的控制措施。

表 1.4-3 减速度速率的等级				
项 目	状 态			
减速度率等级	低减速率 1	低减速率 2	中等减速率	高减速率
No. 1 三极管	导通	截止	截止	导通
No. 2 三极管	导通	导通	截止	截止

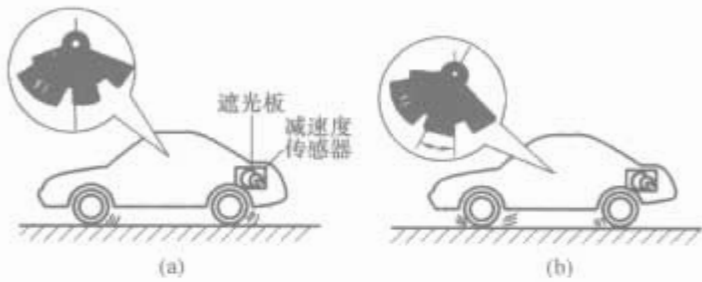


图 1.4-21 光电式减速度传感器工作情况
(a) 匀速行驶；(b) 减速行驶

2.4.2.2 水银式减速度传感器

水银式减速度传感器的结构如图 1.4-22 (a) 所示，由玻璃管和水银组成。当汽车在低附着系数路面上制动时，汽车减速度小，水银在玻璃管内基本不动，传感器电路接通，ABS ECU 便按低附着系数路面上的控制程序控制制动系统工作，如图 1.4-22 (b) 所示。

当汽车在高附着系数路面上制动时，汽车减速度大，传感器玻璃管内的水银在惯性力作用下前移，传感器电路断开，ABS ECU 便按高附着系数路面上的控制程序控制制动系统工作，如图 1.4-22 (c) 所示。

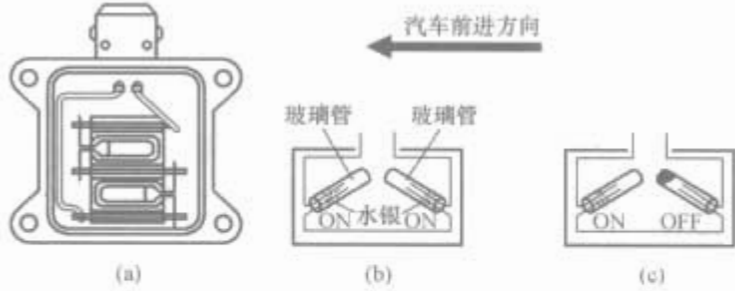


图 1.4-22 水银式减速度传感器结构原理
(a) 整体结构；(b) 减速度小时；(c) 减速度大时

由水银式减速度传感器的结构可见，该传感器可以检测前、后或左、右两个方向的加、减速度，因此可以用作横向加速度传感器。当汽车的横向加速度低于设定值时，水银在玻璃管内基本不动，传感器电路接通，向 ABS ECU 输入一个高电平信号；当汽车高速急转弯时，横向加速度超过设定值，水银在惯性作用下移动，传感器电路断开，向 ABS ECU 输入一个低电平信号。ABS ECU 接收到横向加速度超过设定值的信号后，立即发出控制指令，修正左、右车轮制动分泵压力，以便提高 ABS 的制动性能。横向加速度传感器在高级轿车和赛车上采用较多。

2.4.3 控制开关

2.4.3.1 制动灯开关

制动灯开关安装在制动踏板旁边。当驾驶员踩下制动踏板时，制动灯开关接通，将制动信号输入 ABS ECU，同时接通汽车尾部的制动灯电路。

2.4.3.2 制动液位指示灯开关

当制动液液面降低到一定位置时，制动液位指示灯开关接通，同时接通制动液位指示灯和 ABS 指示灯电路，指示灯发亮提醒驾驶员及时添加制动液。

2.4.3.3 驻车制动指示灯开关

当驾驶员拉紧驻车制动手柄时，驻车制动指示灯开关接通，同时接通驻车制动指示灯和 ABS 指示灯电路，指示灯发亮；当驻车制动手柄放松时，指示灯熄灭，ABS 可以投入工作。

2.4.4 防抱死制动电子控制单元

防抱死制动电子控制单元（ABS ECU）的主要功用是接收轮速传感器、减速度传感器信号和各种控制开关信号，根据设定的控制逻辑，通过数学计算和逻辑判断输出控制指令，控制制动压力调节器调节制动分泵的制动压力。

从开始研制 ABS ECU 至今,其发展变化很大。硬件由安装在印刷电路板上的单片微型计算机和一系列电子元器件构成,现在大多数由集成度高、运算速度快的数字电路组成,并封装在金属壳体内形成一个独立的整体。软件主要是一系列控制程序和大量的试验数据,存储在只读存储器 (ROM) 中。虽然各种车型 ABS ECU 内部电路及控制程序各不相同,但是其基本组成大致相同,主要由主控 CPU、辅控 CPU、稳压模块电路、电磁阀电源模块电路、电磁阀驱动模块电路、回液泵电动机驱动模块电路、信号处理模块电路元件安全保护电路等组成,如图 1.4-23 所示。

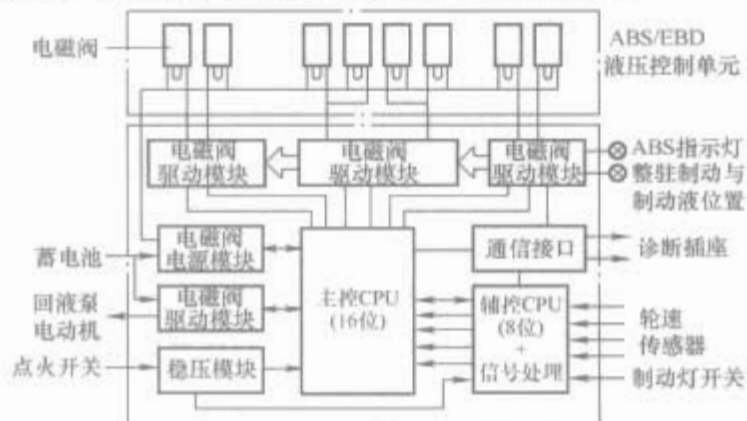


图 1.4-23 ABS ECU 电路组成框图

ABS ECU 采用了两个微处理器 CPU,其中一个为主控 CPU,另一个为辅控 CPU,主要目的是保证 ABS 的安全性。两个 CPU 接收同样的输入信号,在运算处理过程中,通过通信对两个微处理器的处理结果进行比较。如果两个微处理器处理结果不一致,微处理器立即发出控制指令使 ABS 退出工作,防止系统发生逻辑错误。

2.4.4.1 信号处理电路

信号处理模块电路由低通滤波电路和整形放大电路等组成,其功用是对轮速传感器输入的交变电压信号进行处理,并传送给主控 CPU 和辅控 CPU。与此同时,信号处理电路还要接收点火开关、制动灯开关、液位开关等外部信号。

2.4.4.2 计算电路

计算电路是 ABS ECU 的核心,主要由微处理器构成。其功用是根据轮速传感器和控制开关信号,按照预先编制的程序进行数学计算和逻辑判断,形成相应的控制指令。计算电路按照设定的程序,根据轮速传感器输入的轮速信号,计算出车轮瞬时速度,然后得出加(减)速度、初始速度、参考车速和滑移率,最后根据加、减速度和滑移率形成相应的控制指令,再向电磁阀控制电路输出制动压力降低、保持或升高的控制信号。

计算电路不仅能够监测自己内部的工作过程,而且还能监测系统控制部件的工作状况,如轮速传感器、泵电动机工作电路、电磁阀工作电路等,当监测到这些电路工作不正常时,立即向安全保护电路输出指令,使 ABS 停止工作。

2.4.4.3 驱动电路

驱动模块电路的主要功用是将 CPU 输出的数字信号(如控制压力升高、保持、降低信号)进行功率放大并驱动执行元件(电磁阀、电动机)工作,实现制动压力升高、保持或降低的调节功能。

2.4.4.4 安全保护电路

安全保护电路由电源监控、故障记忆和 ABS 指示灯驱动电路等组成。其主要功用是接收蓄电池(或发电机)的电压信号,监控电源电压是否在稳定范围内,同时将 12V 或 14V 电源电压变换为 ECU 工作需要的 5V 电压。

由于 CPU 具有监测功能,该电路能根据 CPU 输出的指

令,对有关继电器电路、ABS 指示灯电路进行控制。当发现影响 ABS 工作的故障(如电源电压、轮速传感器信号、计算电路、电磁阀控制电路等出现异常)时,CPU 就会发出指令使 ABS 停止工作,恢复常规制动功能,起到失效保护作用。同时接通仪表盘上的 ABS 指示灯电路使 ABS 指示灯发亮,提醒驾驶员 ABS 及时检修。ABS ECU 具有故障记忆功能,当 ECU 监测到 ABS 出现故障时,除控制执行上述动作外,还要将故障信息编成代码存储在存储器中,以备自诊断时读取故障代码,以供维修诊断参考。

2.5 防抱死制动液压控制系统

液压控制系统由制动压力调节器和常规制动装置的制动总泵、制动分泵、制动助力器、制动管路等组成,图 1.4-24 所示为 MK20-I 型 ABS 液压控制系统原理图。

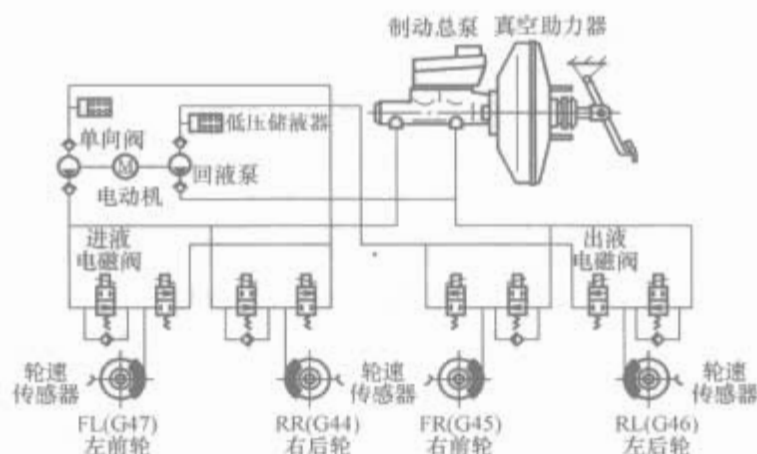


图 1.4-24 MK20-I 型 ABS 液压控制系统原理图

制动压力调节器(又称为液压调节器)是 ABS 的执行器,由电磁阀、储液器和回液泵电动机组成,安装在制动总泵(主缸)与车轮制动分泵(轮缸)之间,主要功用是根据 ABS ECU 的控制指令,自动调节制动分泵(轮缸)的制动压力。

电磁阀是制动压力调节器的主要部件,通过电磁阀动作便可控制制动压力升高、保持和降低。ABS 常用的电磁阀有两位两通电磁阀和三位三通电磁阀两种。

2.5.1 制动压力调节器分类

制动压力调节器种类较多,其结构和工作原理差异也较大,可根据动力来源、总体结构和调压方式进行分类。

2.5.1.1 根据动力来源分类

根据制动压力动力来源不同,制动压力调节器分为液压式和气压式两种。气压式主要用于大型客车和载重汽车,液压式主要用于小轿车和轻型载货汽车。

2.5.1.2 根据总体结构分类

根据总体结构不同,制动压力调节器分为整体式和分离式两种。分离式制动压力调节器自成一体,通过制动管路与制动总泵(或制动助力器)相连。分离式在汽车上布置灵活、成本相对较低,但制动管路接头相对较多。大多数 ABS 采用了分离式制动压力调节器,如博世 ABS 2S、ABS 2E、ABS 2U、ABS/ASR2U 型,戴维斯 MK IV、MK20 型,德尔科 ABS VI、ABS/TRC VI 型,本迪克斯 ABS4、ABS6 型,本田 4WALB 型等。

整体式制动压力调节器与制动总泵(或制动助力器)构成一个整体。整体式结构紧凑、管路接头少,但成本较高,大多用在将 ABS 作为标准装备的轿车上,如戴维斯 MK II 型,博世 ABS3 型,德尔科 ABS VI 型,本迪克斯 ABS9、ABS10 型,瓦布克 ABS 等。

2.5.1.3 根据调压方式分类

根据调压方式不同,制动压力调节器分为流通式和变容

式两种。流通式压力调节器又称为循环式或环流式，其特点是在制动总泵（或制动助力器）与制动分泵之间串联一个或两个电磁阀，由电磁阀根据 ABS ECU 指令，通过控制制动液的流通情况来调节制动分泵压力。博世、戴维斯系列 ABS 都采用这种形式。减压时使制动分泵的制动液回流到制动总泵（或储液器）；保压时使制动分泵的制动液既不流出也不流入；增压时使制动总泵（或储液器）的制动液流入制动分泵。

变容式制动压力调节器的特点是在原制动管路中并联一套液压装置，该装置中有一个类似活塞的装置。ABS 工作时，该装置首先将制动分泵和总泵隔离，然后通过电磁阀的开闭或电动机的转动控制活塞在调压缸中运动，使调压缸工作室至制动分泵的容积发生变化。容积增大，制动压力降低；容积减小，制动压力升高；容积不变，压力保持不变。德尔科 ABS、本田 4WALB 型 ABS 采用了此种调压方式。

2.5.1.4 根据电磁阀结构分类

根据电磁阀结构不同，制动压力调节器分为两位两通电磁阀式和三位三通电磁阀式两种。

2.5.2 两位两通电磁阀

2.5.2.1 两位两通电磁阀的结构特点

桑塔纳 2000GSI 型和红旗 CA7200E 型轿车 ABS 的制动压力调节器采用了 8 只两位两通电磁阀。在通向每一个车轮制动分泵的管路中，都设有一个进液阀和一个出液阀，4 只进液阀为常开电磁阀，4 只出液阀为常闭电磁阀。两位两通常开电磁阀与常闭电磁阀的结构基本相同，主要由电磁铁机构、球阀、复位弹簧、顶杆、限压阀和阀体等组成，如图 1.4-25 所示。在电磁线圈未通电时，常开电磁阀的球阀与阀座处于分离状态，常闭电磁阀的球阀与阀座处于接触状态。

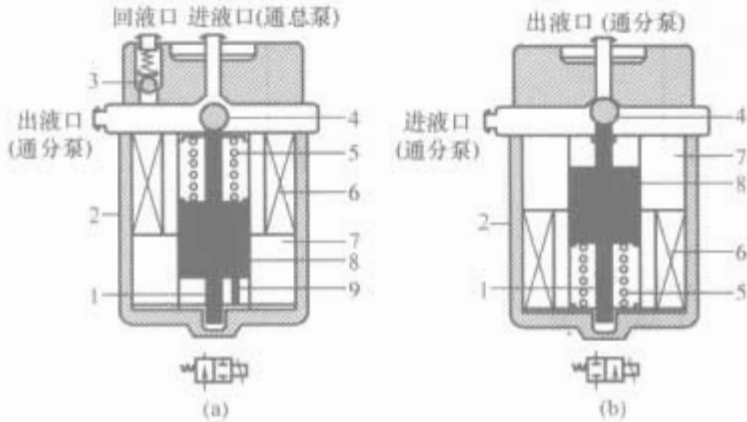


图 1.4-25 两位两通电磁阀的结构

(a) 常开电磁阀；(b) 常闭电磁阀

- 1—顶杆；2—壳体；3—限压阀；4—球阀；5—复位弹簧；
6—电磁线圈；7—阀体；8—活动铁心；9—限位杆

在常开电磁阀中，设有一根顶杆，顶杆和限位杆与活动铁心固定在一起，复位弹簧一端压在活动铁心上，另一端压在与阀体相连的弹簧座上。限压阀的功用是限制电磁阀的最高压力。当制动液压力过高时，限压阀打开泄压，以免压力过高损坏电磁阀。在两位两通常闭电磁阀中，一般不设置限压阀。

2.5.2.2 两位两通电磁阀的工作情况

两位两通常开与常闭电磁阀的工作原理基本相同，下面以常开电磁阀为例说明其工作过程。

当电磁线圈未通电时，在复位弹簧弹力作用下，活动铁心带动顶杆和限位杆下移复位，直到限位杆与缓冲垫圈相抵为止。顶杆下移时，球阀随之下移，使电磁阀阀门处于开启状态，制动液从进液口经球阀阀门、出液口流出。

当电磁线圈有电流流过时，活动铁心产生电磁吸力，压缩复位弹簧并带动顶杆一起上移，顶杆将球阀压在阀座上，电磁阀阀门处于关闭状态，进液口与出液口之间的制动液通道关闭。

由上可见，该电磁阀是根据电磁线圈通电和断电，使球阀处于开启和关闭两个位置或两种状态，同时又有进液口与出液口两条通路，因此成为两位两通（二位二通）电磁阀。如果球阀在电磁线圈未通电时处于开启状态，那么就称为两位两通常开电磁阀，如果电磁线圈未通电时，球阀处于关闭状态，那么就称为常闭电磁阀。

2.5.3 三位三通电磁阀

2.5.3.1 三位三通电磁阀的结构特点

奥迪 100 和 200 型以及丰田系列轿车 ABS 采用了三位三通电磁阀，结构如图 1.4-26 (a) 所示。

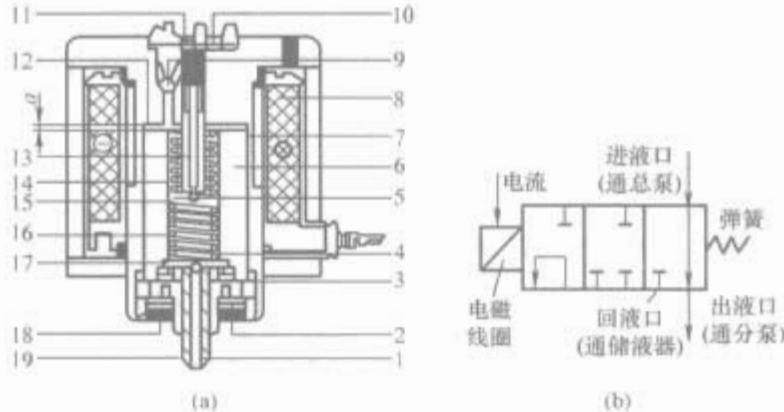


图 1.4-26 奥迪 100/200 型轿车三位三通电磁阀结构与表示符号

(a) 结构简图；(b) 表示符号

- 1—回液口（连接回液管）；2、10—过滤器；3、7—非磁性支承环；4—回液球阀；5—进液球阀；6—阀芯；8—电磁线圈；9—单向阀；11—进液口（连接主缸）；12—阀芯工作气隙（ $a=0.25\text{mm}$ ）；13—进液球阀阀座；14—副弹簧；15、17—压板；16—主弹簧；18—出液口（连接轮缸）；19—回液球阀阀座

电磁阀的进液口 11 通过制动管路与制动总泵（主缸）相连，出液口 18 通过制动管路与制动分泵（轮缸）相连，回液口 1 通过回液管与储液器相连，回液球阀 4 焊接在压板 17 上，进液球阀 5 焊接在压板 15 上。进液口和出液口的过滤器 2、10 用于过滤制动液中的杂质，保证球阀密封良好。球阀与阀座的加工精度极高，在 20MPa 压力下仍能保证密封良好。阀芯采用非磁性支承环 3、7 导向，以便减小摩擦。

2.5.3.2 三位三通电磁阀的工作情况

三位三通电磁阀的工作状态由 ABS ECU 通过控制电磁线圈 8（见图 1.4-26）中流过电流的大小进行控制，工作情况如下：

(1) 当电磁线圈未接通电流（ $I=0\text{A}$ ）时，在主、副弹簧预紧力的作用下，阀芯下移至极限位置，使进液球阀打开（即进液口打开），回液球阀紧压在阀座上，回液阀处于关闭状态（即回液口关闭）。因此，来自制动总泵的制动液经进液口、进液球阀、电磁阀腔室、出液口流入车轮制动分泵，如图 1.4-27 (a) 所示，从而使制动分泵内制动液压力随制动踏板力升高而升高。

(2) 当电磁线圈通过电流较小（ $I=2\text{A}$ ）而产生的电磁吸力较小时，阀芯向上位移量较小（约 0.1mm）。阀芯上移时，压缩刚度较大的主弹簧并推动压板压缩刚度较小的副弹簧，使进液球阀关闭（即进液口关闭），但压板位移量很小，不足以使回液球阀打开。由于进液口和回液口都被关闭，制动液既不增加也不减少，因此制动分泵中制动液的压力保持

不变，如图 1.4-27 (b) 所示。

(3) 当电磁线圈通过的电流较大 ($I=5\text{ A}$) 而产生的电磁吸力较大时，阀芯向上的位移量较大 (2.5mm)。阀芯带动压板上移使回液阀开启 (即回液口打开)，进液阀保持关闭状态。此时制动分泵的制动液经回液口、回液管流入储液器，使制动分泵压力降低，如图 1.4-27 (c) 所示。

单向阀 9 (见图 1.4-26) 与进液阀并列设置，当电磁阀腔室内制动液压力高于进液口制动液压力时，腔室内制动液压力将克服单向阀弹簧的弹力将单向阀推开，制动液将从进液口流出而泄压，保证电磁阀腔室内制动液压力不会高于进液口制动液的压力。单向阀的另一个功用是在制动踏板放松时，使制动分泵中的制动液保持一定的压力。

由上可见，电磁阀在电磁线圈电流大小不同时，其动作具有上、中、下三个工作位置。此外，由于该电磁阀具有进液口、出液口和回液口三个通路，所以称为三位三通电磁阀，简称为 3/3 电磁阀，在工程图其表示符号如图 1.4-26 (b) 所示。

2.5.4 储液器与电动回液泵

储液器又称为储液罐，分为低压储液器 and 高压储液器两种，分别与不同型式的制动压力调节器配用。低压储液器主要用于储存 ABS 减压过程中从制动分泵流回的制动液，同时衰减回流制动液的压力波动。高压储液器通常称为蓄压

器，用于储存制动时所需的高压制动液。高压储液器大多为黑色气囊，它是制动系统的能源，故又称为蓄能器。

2.5.4.1 储液器与电动回液泵的结构特点

低压储液器内设有一个活塞和弹簧。电动回液泵又称为电动泵或回液泵，由永磁式直流电动机与柱塞泵组成。电动机根据 ABS ECU 的控制指令，通过凸轮驱动柱塞在泵套内上下运动，如图 1.4-28 所示。

2.5.4.2 储液器与电动回液泵的工作原理

在 ABS 工作过程中，当需要制动压力降低时，制动压力调节器的回液阀打开，具有一定压力的制动液就会从制动分泵经制动压力调节器的回液阀流入储液器和柱塞泵。与此同时，ABS ECU 控制电动回液泵转动，驱动柱塞泵的凸轮随电动泵旋转而转动。

当凸轮驱动柱塞上升时，柱塞泵的进液阀打开，回液阀在弹簧弹力作用下关闭，制动液流入柱塞泵泵腔，如图 1.4-28 (a) 所示。当柱塞下行时，泵腔内制动液压力升高，克服出液阀弹簧弹力将出液阀打开，制动液压入制动总泵，如图 1.4-28 (b) 所示。由于电动泵的主要功用是将制动液泵回制动总泵，所以称为电动回液泵。

制动液流入储液器时，推动活塞并压缩弹簧向下移动，使储液器储液容积增大，暂时储存制动液，减小回流制动液的压力波动。

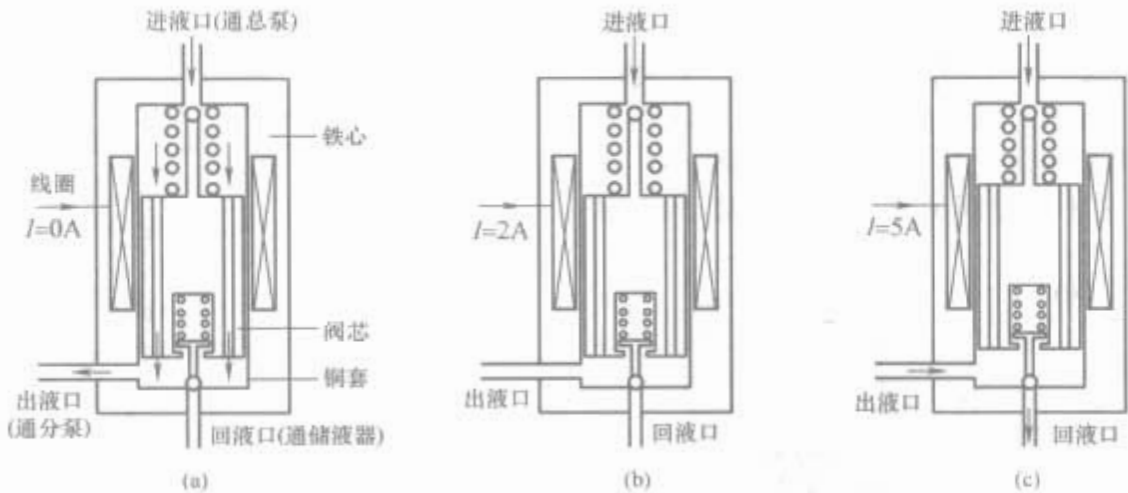


图 1.4-27 三位三通电磁阀工作原理
(a) 升压位置；(b) 保压位置；(c) 降压位置

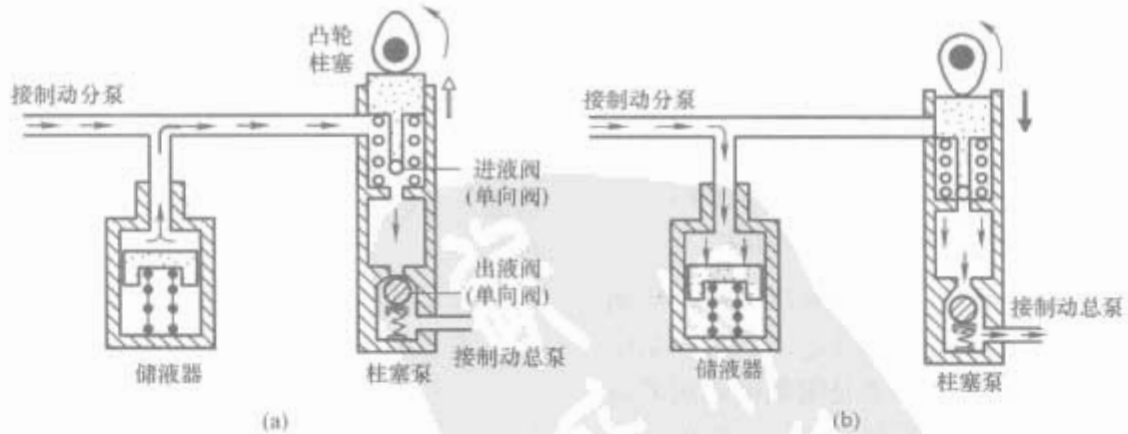


图 1.4-28 低压储液器与电动系
(a) 柱塞上行时储液；(b) 柱塞下行时回液

2.6 防抱死制动系统控制过程

电子控制防抱死制动系统是通过调节制动分泵中制动液压力升高、保持或降低来实现防抱死制动。在制动过程中，ECU 根据车轮减速度和滑移率是否达到某一设定值来判定车轮是工作在附着系数—滑移率曲线的稳定区域还是工作在

非稳定区域，并通过调节制动分泵的制动液压力，充分利用轮胎—道路附着力将车轮滑移率控制在 10%~30% 的稳定区域范围内，从而获得最佳制动性能。下面以三位三通电磁阀式 ABS 的控制过程为例说明。

在装备三位三通电磁阀式制动压力调节器的防抱死制动系统 ABS 中，每次接通点火开关时 ABS 就会自动进入自检

状态。在自检过程中，仪表盘上的 ABS 指示灯发亮约 2s 后自动熄灭，同时能够听到继电器触点断开与闭合的响声以及回液（油）泵电动机起动时的响声，在制动踏板上也能感觉到轻微的振动。

当 ABS 在汽车行驶过程中发生故障时，ABS 将自动关闭，同时控制仪表盘上的 ABS 指示灯发亮，此时常规制动系统将继续保持正常工作状态。

当控制系统的电源电压低于允许的最低电压值（10.5V）时，ABS 也将自动关闭，此时 ABS 指示灯将发亮指示。一旦电源电压恢复正常值时，ABS 将再次起动，指示灯自动熄灭。

当驾驶员踩下制动踏板时，ABS 将投入工作，制动压力调节器各执行元件的工作状态见表 1.4-4。

表 1.4-4 三位三通电磁阀式制动压力调节器工作状态

执行元件名称	常规制动时	保压时	降压时	升压时
进液阀	打开	关闭	关闭	打开
出液阀	关闭	关闭	打开	关闭
回液泵电动机	不转动	运转	运转	运转

2.6.1 常规制动（ABS 不工作）时制动系统工作情况

汽车正常行驶或常规制动（ABS 未投入工作）时，制动压力调节器的工作状态如图 1.4-29 所示。在 ABS ECU 控制下，电磁阀和电动泵均不通电，三位三通电磁阀在回位弹簧作用下，进液阀打开、回液阀关闭。进液阀打开将制动总泵与制动分泵之间的油液管路构成通路；回液阀关闭将制动分泵与储液器之间的油液管路关闭，各执行元件的工作状态见表 1.4-4。

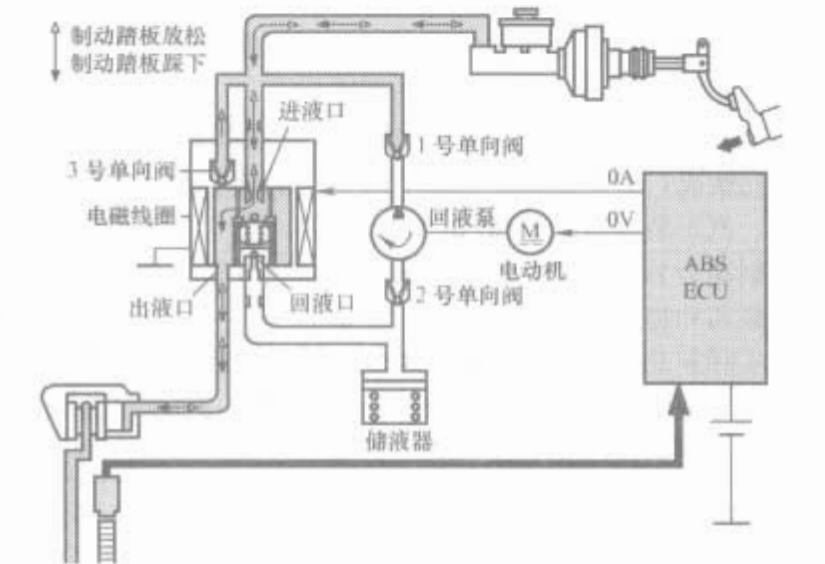


图 1.4-29 常规制动时三位三通电磁阀式 ABS 工作情况

当踩下制动踏板时，制动总泵中制动油液压力升高，制动液从制动总泵流入制动分泵，制动液通道为：制动总泵→三位三通电磁阀进液阀→电磁阀腔室→出液口→制动分泵。制动分泵制动液的压力随制动总泵制动液的压力升高而升高。

当放松制动踏板时，制动分泵中具有一定压力的制动液通过两条通道流回制动总泵。一条通道为：制动分泵→三位三通电磁阀出液口→电磁阀腔室→进液口→制动总泵；另一条通道为：制动分泵→三位三通电磁阀出液口→电磁阀腔室→3 号单向阀→制动总泵。

位于回液泵管路中的 2 号单向阀的功用是防止制动液流入回液泵。

2.6.2 制动压力保持（保压）时制动系统工作情况

在汽车制动过程中，当四个车轮中的任意一个趋于抱死时，制动压力调节器就会根据 ABS ECU 的控制指令，通过

调节该车轮制动分泵的制动液压力降压、保压或升压来达到防抱死制动的目的。

当车轮制动分泵管路中的制动液压力升高或降低、传感器信号表明车轮减速度或滑移率达到设定阈值需要保持制动压力时，ABS ECU 便控制电磁阀线圈接通较小电流（约 2A），使电磁阀的阀芯克服回位弹簧弹力移动较小间隙，从而使进液阀和回液阀均处于关闭状态，制动液在管路中不能流动，如图 1.4-30 所示，压力处于保持状态。保压时各执行元件的工作状态见表 1.4-4，此时泵电动机运转将储液器中剩余的制动液泵回制动总泵。

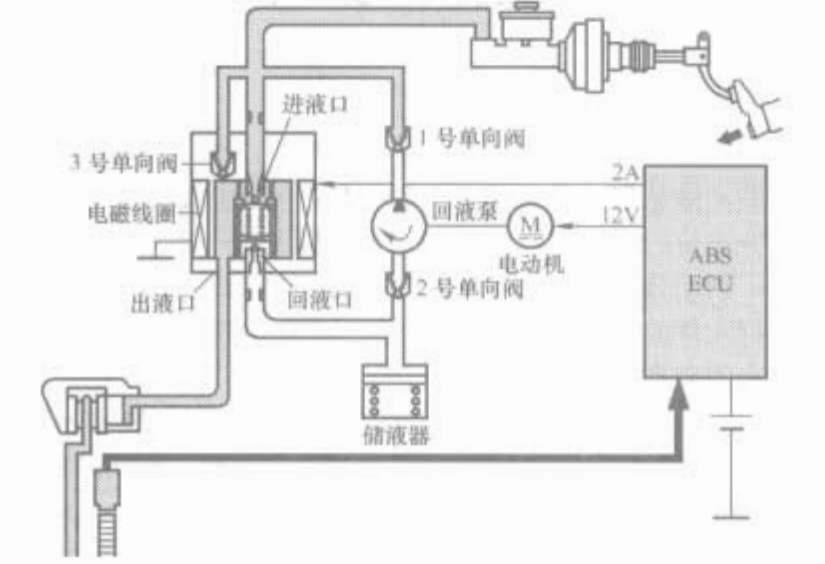


图 1.4-30 保压时三位三通电磁阀式 ABS 工作情况

2.6.3 制动压力降低（降压）时制动系统工作情况

当 ABS ECU 判定某个车轮制动趋于抱死需要降低制动压力时，ABS ECU 便控制电磁阀线圈接通较大电流（约 5 A），产生较强电磁吸力使三位三通电磁阀的阀芯移动较大间隙，从而使进液阀关闭、回液阀打开（见图 1.4-31），制动分泵中的制动液便从出液口、回液口流入储液器。与此同时，ABS ECU 还将接通回液泵电动机电源，电动机和回液泵运转将储液器中的制动液泵回制动总泵。回液通道为：制动分泵→出液口→电磁阀腔室→回液阀→储液器→2 号单向阀→电动回液泵→1 号单向阀→制动总泵。

随着制动分泵中的制动液流回制动总泵，其制动管路中制动液的压力随之降低，从而达到防止车轮抱死之目的。

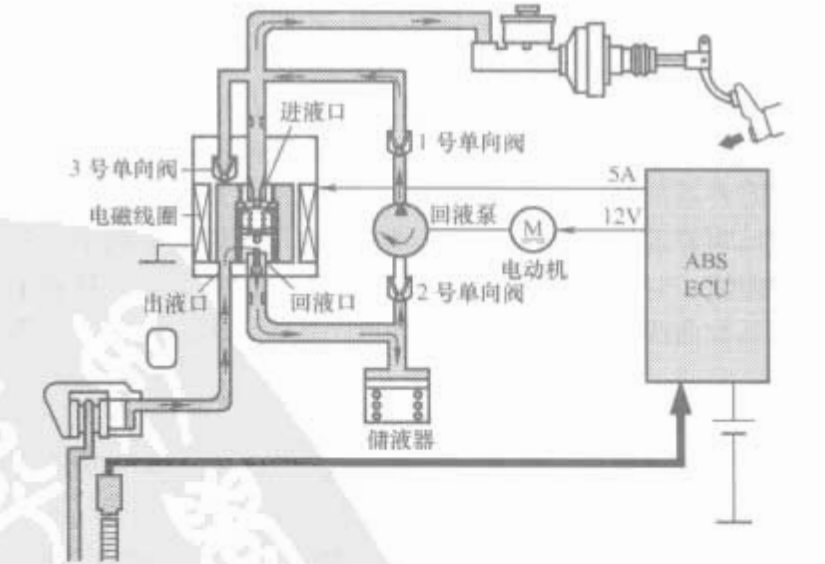


图 1.4-31 降压时三位三通电磁阀式 ABS 工作情况

2.6.4 制动压力升高（升压）时制动系统工作情况

当需要升高车轮制动分泵制动液压力时，ABS ECU 将切断三位三通电磁阀线圈电流（0A），电磁阀在回位弹簧弹力作用下复位，进液阀打开、回液阀关闭，如图 1.4-32 所示。进液阀打开将制动总泵与制动分泵之间的管路构成通路，回液阀关闭将制动分泵与储液器之间的油液管路关闭。

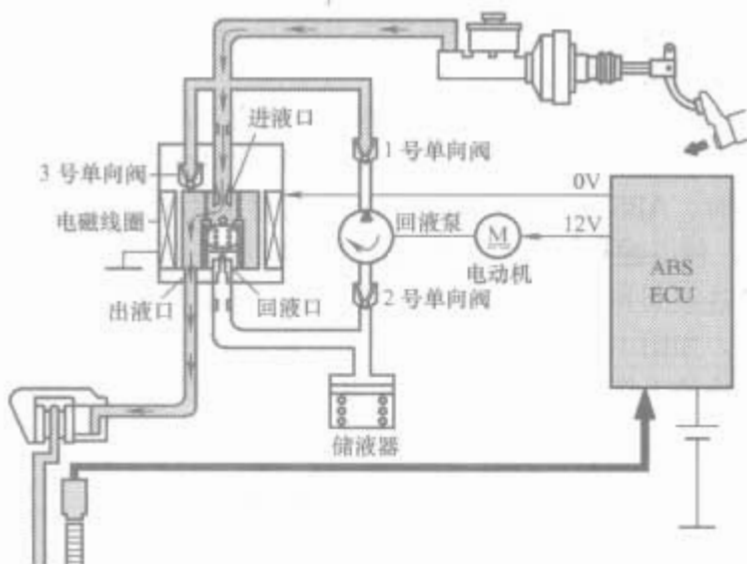


图 1.4-32 升压时三位三通电磁阀式 ABS 工作情况

制动液从制动总泵流入制动分泵，制动液通道为：制动总泵→三位三通电磁阀进液阀→电磁阀腔室→出液口→制动分泵。制动分泵的压力随制动总泵制动液压力升高而升高，各执行元件的工作状态见表 1.4-4。泵电动机运转将储液器中剩余的制动液泵回制动总泵。

当制动液从制动总泵流入制动分泵时，制动踏板下沉；当制动液从制动分泵和储液器泵回制动总泵时，制动踏板上升。因此制动踏板振动作用在脚掌上会有抖动感觉，这种感觉在装备 M K20-I 型两位两通电磁阀 ABS 的桑塔纳 2000GSi 时代超人型轿车上为每秒钟 2~7 次，在装备三位三通电磁阀 ABS 的奥迪轿车上为每秒钟 4~10 次。

2.7 电子控制制动力分配技术

电子控制制动力分配 (Electronic Control Brakeforce Distribution, EBD) 功能是防抱死制动系统 ABS 的辅助功能。在 ABS 的基础上添加限压阀、比例阀、感载比例阀或减速度传感比例阀等硬件装置，并编制相应的软件程序即可实现制动力分配的最佳控制。

2.7.1 对前、后轮制动器制动力分配的要求

前、后轮制动器制动力具有固定比值的汽车在制动过程中，为了防止后轴抱死发生危险的侧滑现象，汽车制动系实际的前、后轮制动器制动力分配线 (β 线) 应当控制在理想的前、后轮制动器制动力分配曲线 (I 曲线) 的下方；为了减少制动时前轮抱死而失去转向能力的机会并提高附着效率， β 线应当尽可能靠近 I 曲线。同样，若按利用附着系数 φ 曲线图来考虑，为了防止后轮抱死并提高制动效率，前轴利用附着系数曲线应当控制在 45° 对角线上方，即控制在后轴利用附着系数曲线的上方，同时还应尽可能靠近利用附着系数曲线。对于具有理想制动器制动力分配的汽车，其利用附着系数曲线就是 φ 等于制动强度 z 的对角线 (即 45° 对角线)。

2.7.2 制动法规对制动力分配的要求

为了保证制动时汽车的方向稳定性和有足够的制动效率，联合国的欧洲经济委员会 (Economic Commission of Europe, ECE) 制定了 ECE R13 制动法规，对双轴汽车前、后轮制动器的制动力提出了明确的要求，我国汽车行业标准 ZBT 240007—1989 也提出了类似的要求。

ECE 法规规定，对于利用附着系数 $\varphi=0.2\sim0.8$ 之间的各种车辆，要求制动强度：

$$z \geq 0.1 + 0.85(\varphi - 0.2)$$

车辆在各种载荷状态下，前轴利用附着系数曲线应在后轴利用附着系数曲线之上。

对于最大总质量大于 3.5t 的货车，当制动强度 $z=0.15\sim0.3$ 之间时，每根轴利用附着系数曲线位于 $\varphi=z\pm0.08$ 的两条平行于理想附着系数直线的平行线之间；当制动强度 $z\geq0.3$ 时，若后轴利用附着系数满足关系式 $z\geq0.3+0.74(\varphi-0.38)$ ，则认为也满足了法规的要求，如图 1.4-33 所示。但是，对轿车而言，当制动强度在 $z=0.3\sim0.4$ 之间时，在后轴利用附着系数曲线不超过直线 $\varphi=z+0.05$ 的条件下，允许后轴利用附着系数曲线在前轴利用附着系数曲线的上方。

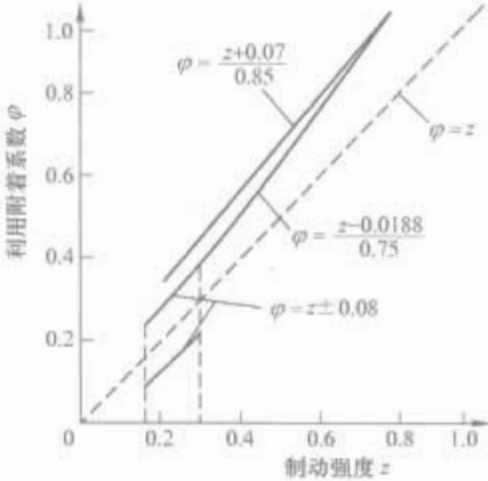


图 1.4-33 ECE 法规货车的制动力分配

2.7.3 制动力分配的控制

对于具有固定比值的前、后制动器制动力的制动系特性，其实际制动力分配曲线与理想的制动力分配曲线相差很大，制动效率低，前轮可能因抱死而丧失转向能力，后轮也可能抱死而使汽车有发生后轴侧滑的危险。因此，现代汽车设有电子控制制动力分配程序 EBD 或比例阀、感载比例阀等制动力调节装置，根据制动强度 (制动减速度)、载荷等因素来改变前、后制动器制动力的比值，使之接近于理想制动力分配曲线，满足制动法规的要求。

在汽车制动时，EBD 将根据前后轮载荷的变化以及车轮抱死情况，通过制动压力调节装置自动调节前后车轮的制动力。汽车装备带有 EBD 的 ABS 之后，由于各车轮具有理想的制动力分配，因此，能够进一步缩短汽车紧急制动时的制动距离和提高制动稳定性。

实际制动力分配曲线是兼顾制动稳定性和最短制动距离并优先考虑稳定性的原则进行设计。图 1.4-34 所示为设有限压阀、比例阀、感载比例阀、感载射线阀与减速度传感比

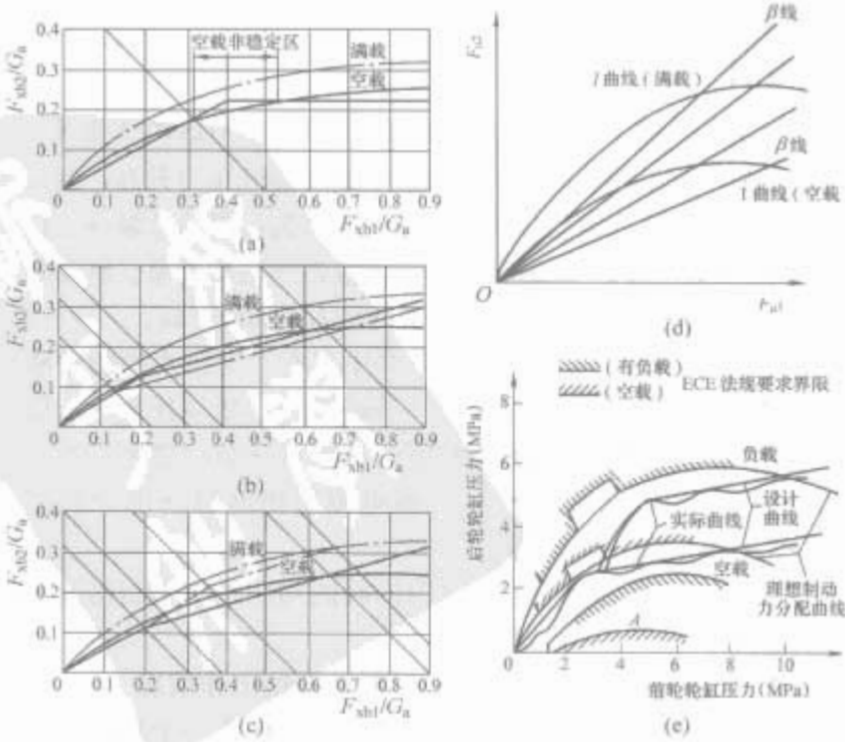


图 1.4-34 各种装置调节的制动力分配曲线

例阀 (D. S. P. V.) 的制动力分配曲线。但是, 制动力分配曲线实际转折点的选择是复杂的, 因为前面所讲的 I 曲线是简单的直线制动情况, 实际的制动工况会使 I 曲线发生改变, 例如发动机对制动的影 响, 转弯制动时左、右车轮载荷转移的影响等。所以, 转折点的选择一般低于 I 曲线, 以保证有一定的稳定性的余地。

图 1.4-34 (a) 所示为设置限压阀的制动力分配曲线, 在其转折点后, 后轮液压不变, 是一水平线。虽然分配线对空载基本是合适的, 但是仍有一小段是非稳定区, 且满载时效率偏低。

图 1.4-34 (b) 所示为设置比例阀的制动力分配曲线, 在其转折点后是一条斜线, 且与空载 I 曲线的交点即同步附着系数超过了 0.82 (见 ECE 法规), 既消除了不稳定区又提高了制动效率; 但是满载时转折点下移会增加和 I 曲线的距离, 降低制动效率。

图 1.4-34 (c) 所示为设置感载比例阀的制动力分配曲线, 满载时转折点上移与满载 I 曲线靠近, 提高了制动效率。

图 1.4-34 (d) 所示为设置感载射线阀的制动力分配曲线。

图 1.4-34 (e) 所示为根据 ECE 法规要求计算得到的轿车制动力分配所要求的范围。可见, 采用减速度传感比例阀能够满足 ECE 法规要求。

2.8 驱动轮防滑转的控制原理

汽车驱动轮防滑转控制系统通常称为防滑转调节系统 ASR。由于防止驱动轮滑转都是通过调节驱动轮的驱动力 (牵引力) 来实现, 因此又称为牵引力控制系统 TCS 或 TRC。

众所周知, 汽车在起步、加速或冰雪路面上行驶时, 容易出现打滑现象。这是因为汽车发动机传递给车轮的最大驱动力是由轮胎与路面之间的附着系数和地面作用在驱动轮上的法向反力的乘积 (即附着力) 决定的。当传递给车轮的驱动力超过附着力时, 车轮就会发生打滑空转 (即滑转)。

当汽车在低附着系数路面 (如泥泞路面、冰雪路面) 上行驶时, 由于地面对车轮施加的反作用转矩很小, 因此在起步、加速时驱动轮就会发生滑转。此外, 当汽车在越野条件下行驶时, 如果某个 (或某些) 驱动轮处在附着系数极低的路面 (如冰雪路面或泥泞路面) 上, 那么地面对车轮施加的反作用转矩将很小, 虽然另一个 (或一些) 车轮处在附着系数较高的路面上, 但是根据差速器转矩等量分配特性, 它们能够提供的驱动转矩只能与处在低附着系数路面上车轮提供的驱动转矩相等。因此在驱动力不足的情况下, 汽车将无法前进, 发动机输出的功率大部分消耗在车轮的滑转上。不仅浪费燃油、加速轮胎磨损, 而且降低车辆的通过性能和机动能力。如果在战时, 就会贻误战机而导致人员伤亡、装备损毁。

防止驱动轮滑转曾采用过许多办法, 如安装防滑链, 使用防滑的雪地轮胎和带防滑钉的防滑轮胎等, 但迄今为止最有效的办法还是采用 ASR 系统。ASR 系统的主要功用是在车轮开始滑转时, 通过降低发动机的输出转矩或控制制动系统的制动力等来减小传递给驱动车轮的驱动力, 防止驱动力超过轮胎与路面之间的附着力而导致驱动轮滑转, 提高车辆的通过性改善汽车的方向操纵性和行驶稳定性。

ASR 与 ABS 密切相关, 都是汽车行驶的主动安全系统, 两个系统通常同时采用。ASR 系统是维持附着条件, 充分发挥驱动力的电子调节装置。

2.8.1 驱动力与附着力的关系

当发动机输出转矩增大时, 驱动力随之增大。但是, 驱动力的增大受到附着力的限制, 驱动力的最大值只能等于轮胎与路面之间的附着力。当驱动力超过附着力时, 驱动轮将在路面上滑转。当驾驶员想使汽车快速起步而用力踩下加速踏板时, 尽管车轮快速转动, 但是汽车却原地不动, 原因就是传递给车轮的驱动力超过了附着力。

2.8.2 滑转率与附着系数的关系

2.8.2.1 滑转率

汽车车轮打滑有两种情况: ①汽车制动时车轮抱死滑移; ②汽车驱动时车轮滑转。防抱死制动系统 (ABS) 是防止车轮在制动时抱死而滑移, 防滑转控制系统 (ASR) 则是防止驱动车轮原地不动地滑转。

驱动轮的滑转程度用滑转率表示, 其表达式为

$$S_d = \frac{v_w - v}{v_w} \times 100\%$$
$$v_w = r\omega$$

式中: S_d 为驱动轮的滑转率; v_w 为车轮速度 (车轮瞬时圆周速度), m/s; v 为车速 (车轮中心纵向速度), m/s。

当 $v_w = v$ 时, 滑转率 $S_d = 0$, 车轮自由滚动。

当 $v = 0$ 时, 滑转率 $S_d = 100\%$, 车轮完全处于滑转状态。

当 $v_w > v$ 时, 滑转率 $0 < S_d < 100\%$, 车轮既滚动又滑动。滑转率越大, 车轮滑转程度也就越大。

2.8.2.2 滑转率与附着系数的关系

车轮滑移率和滑转率与纵向附着系数的关系如图 1.4-35 所示, 由图可见:

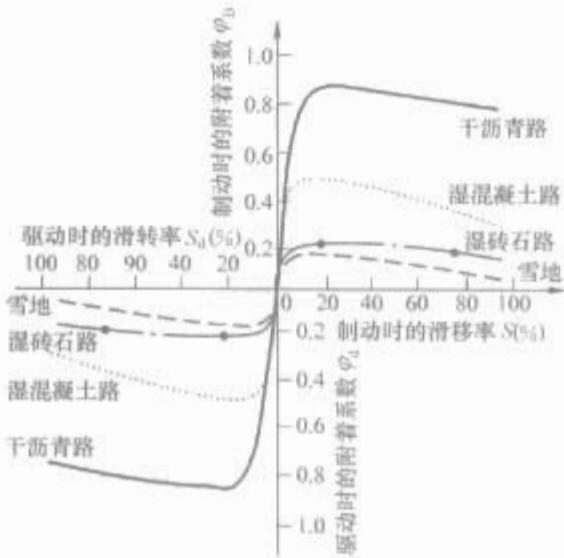


图 1.4-35 滑移率和滑转率与附着系数的关系

- (1) 附着系数随路面性质的不同而发生大幅度地变化。
- (2) 在各种路面上, 附着系数均随滑转率或滑移率的变化而变化, 且在各种路面上当滑转率或滑移率为 20% 左右时, 附着系数达到最大值。若滑转率或滑移率继续增大, 则附着系数逐渐减小。

ASR 的基本控制原理是在车轮滑转时, 将滑转率控制在最佳滑转率 (10%~30%) 范围内, 从而获得较大的附着系数, 使路面能够提供较大的附着力, 车轮的驱动力能够得到充分利用。车辆装备防滑转控制系统 ASR 之后, 当汽车在起步、加速或冰雪路面上行驶时, 驾驶员无须特别小心地踩下加速踏板, ASR 就能根据路面状况调节驱动力, 使驱动轮保持最佳的驱动力。

2.8.3 防驱动轮滑转的控制方法

防止驱动轮滑转的控制方法主要有控制发动机的输出转矩、控制驱动轮的制动力以及控制防滑转差速器的锁止程度

三种。这些控制方法的最终目的都是调节驱动轮上的驱动力，并将驱动轮的滑转率控制在最佳滑转率范围内。

2.8.3.1 控制发动机的输出转矩

通过调节发动机的输出转矩来调节驱动轮的驱动力是实现防滑转控制的方法之一。这种控制系统能够保证发动机输出转矩与地面提供的驱动转矩达到匹配，因此可以改善燃油经济性，减少轮胎磨损，使汽车具有良好的行驶稳定性和乘坐舒适性。对于前轮驱动汽车，能够得到良好的转向操纵性。在装备电子控制燃油喷射系统的汽车上，普遍采用了控制发动机输出转矩的方法来实现防滑转控制。

控制发动机输出转矩的方法有控制点火时间、控制燃油供给量、控制节气门开度等。

(1) 控制点火时间。由内燃机原理可知：减小汽油发动机的点火提前角或切断个别气缸的点火电流，均可微量降低发动机的输出转矩。现代汽车普遍采用电子点火系统，其点火时刻是根据发动机转速、负荷以及冷却液温度等信号确定。在汽车行驶过程中，ASR ECU 根据轮速传感器和车速传感器信号即可计算确定驱动轮滑转率的大小，通过减小点火提前角，即可微量降低发动机的输出转矩。当驱动轮滑转率很大，延迟点火时刻不能达到控制滑转率的目的时，则可中断个别气缸点火来进一步减小滑转率。在中断个别气缸点火时，为了防止排放增加和三元催化转换器过热，在中止点火时必须中断燃油喷射。恢复点火时，点火时间将缓慢提前，保证发动机输出转矩平稳增加。

(2) 控制燃油供给量。短时间中断供油也可微量调节发动机的输出转矩，但响应速度没有减小点火提前角迅速。这种控制方法适用于未采用燃油喷射系统的汽油发动机或柴油发动机汽车。在采用电子加速踏板的汽车上，根据加速踏板行程大小，通过调节汽油发动机节气门开度或柴油发动机喷油泵拉杆位置，使进气量或供油量改变即可调节发动机的输出转矩，控制方法如图 1.4-36 所示。当驾驶员操作加速踏板时，加速踏板的行程信号由传感器输入防滑转电控单元 ASR ECU，ASR ECU 根据预先存储的数据和发动机转速、冷却液温度、进气温度等信号确定伺服电动机（步进电动机）控制电压或电流的大小，再由伺服电动机调节节气门开度或喷油泵拉杆位置，通过调节进气量或供油量来调节发动机的输出转矩。

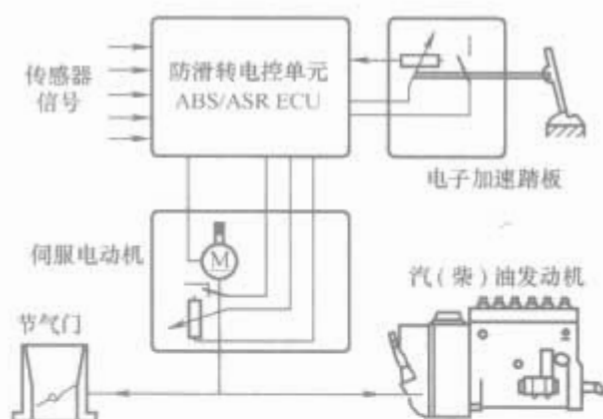


图 1.4-36 发动机输出转矩的控制

(3) 控制节气门开度。控制节气门位置（开度）可以控制进入气缸的进气量，从而能够显著改变发动机的输出转矩，现代汽车（如丰田凌志 LS300、LS400 型轿车）普遍采用这种控制方式。在采用电子控制燃油喷射系统的汽车上，ASR ECU 根据轮速传感器和车速传感器信号计算确定驱动轮滑转率的大小之后，通过控制节气门开度和燃油喷射量等即可调节发动机的输出转矩。当驱动轮滑转率超出规定值范

围时，ASR ECU 便向执行器发出控制指令，减小节气门的开度、缩短喷油器的喷射时间或中断个别喷油器喷油，便可迅速降低发动机的输出转矩，从而防止驱动力滑转。

2.8.3.2 控制驱动轮的制动力

控制驱动轮的制动力实际上是利用差速器的差速作用（效能）来获得较大的驱动力。控制方法如图 1.4-37 所示。

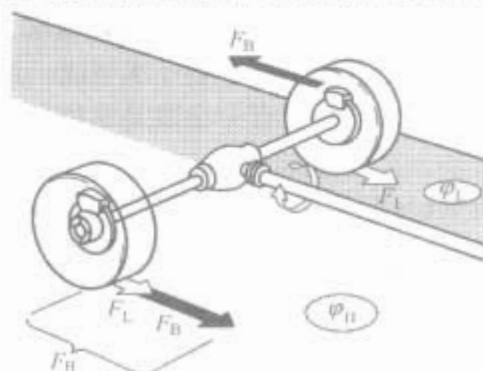


图 1.4-37 作用在驱动轮上的纵向力示意图

处于高附着系数 φ_H 路面上的右侧驱动轮能够产生的驱动力为 F_H ，处于低附着系数 φ_L 路面上的左侧驱动轮能够产生的驱动力为 F_L 。根据差速器转矩等量分配特性，此时汽车的驱动力只取决于低附着系数路面上的驱动力 F_L 。尽管右侧驱动轮能够产生的驱动力为 F_H ，但是其获得的驱动力只能与左侧驱动轮能够产生的驱动力 F_L 相等，即两只驱动轮能够获得的驱动力为 $F_H = F_L + F_L = 2F_L$ 。为了阻止低附着系数路面上行驶的左侧驱动轮产生滑转，对其施加一个制动力 F_B ，通过差速器的差速作用，在右侧驱动轮上也会产生作用力 F_B ，此时两只驱动轮能够获得的驱动力就为 $F_{H'} = F_H + F_L = 2F_L + F_B$ ，即驱动力增大了制动力 F_B 值，发动机的输出转矩就可按增大后的驱动力进行调节。

对驱动轮施加制动力是使驱动轮保持最佳滑转率且响应速度较快的控制方法，一般作为仅采用控制节气门开度来调节发动机输出转矩的补充控制，从而达到响应速度快、方向操纵性和制动稳定性好之目的。在设计控制系统时，为了保证乘坐舒适性，制动力不能太大；为了避免制动器过热，制动时间也不能过长，因此这种方法只限于低速行驶时短时间使用。

2.8.3.3 控制差速器的锁止程度

控制差速器的锁止程度必须采用防滑转差速器进行控制。防滑转差速器是一种由电子控制器控制的可锁止差速器，控制原理如图 1.4-38 所示。

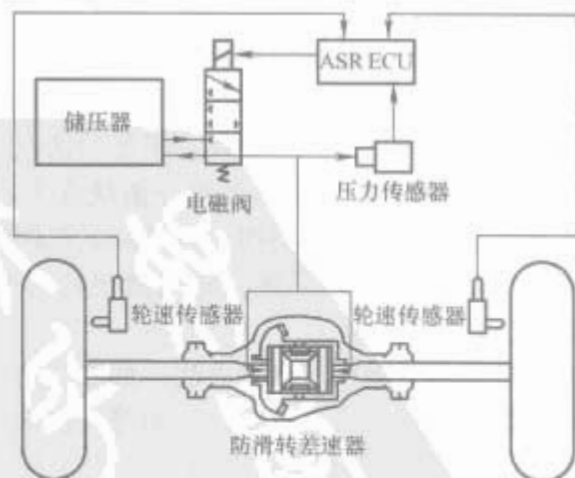


图 1.4-38 防滑转差速器锁止控制示意图

在防滑转差速器向车轮输出驱动力的输出端设置有一个离合器。调节作用在离合片上的油液压力，即可调节差速器的锁止程度。油压逐渐降低时，差速器锁止程度逐渐减小，传递给驱动轮的驱动力就逐渐减小；反之油压升高时，驱动力将逐渐增大。

油液压力来自储压器的高压油液，压力大小由防滑转控制系统的电控单元（ASR ECU）通过控制电磁阀使压力升高、保持、降低进行调节，并由压力传感器和驱动轮上的轮速传感器反馈给电控单元，从而实现反馈控制。

通过调节防滑转差速器的锁止程度，即可调节传递给驱动轮的驱动力，所以汽车在各种附着系数不同的路面上起步和行驶时，都具有较好的稳定性和操纵性。对于越野汽车，则可大大提高越野通过性。

2.9 防滑转控制系统控制过程

上述介绍了防止驱动轮滑转的三种控制方法。在汽车实际装备的防滑转控制系统中，为了充分发挥电子控制系统的控制功能并有效地防止驱动轮滑转，一般都将不同的控制方法组合在一起进行控制。常用的组合方式有：组合控制发动机的输出转矩和驱动轮的制动力、组合控制发动机的输出转矩和控制差速器的锁止程度。下面以组合控制发动机输出转矩和驱动轮制动力的丰田系列轿车防滑转控制系统为例，说明 ASR 的结构特点与控制过程。

2.9.1 防滑转控制系统的结构特点

各型汽车防滑转控制系统 ASR 的结构组成各不相同，丰田凌志 LS300、LS400 型轿车防滑转控制系统 ASR 与防抱死制动系统 ABS 组合构成的简图如图 1.4-39 所示。由图 1.4-39 可见，ASR 和 ABS 都是由液压控制系统和电子控制系统两个子系统组成，并组合在一起。该系统不仅能够实现 ABS 功能，而且能够实现 ASR 功能。

实践经验表明：在控制驱动轮的制动力时，将 ASR 与 ABS 结合在一起是控制驱动轮制动力的最佳方案。这是因为对于前驱动汽车，考虑到舒适性和操纵稳定性，对 ASR 和 ABS 制动压力的建立速度有不同要求。一般说来，ASR 制动压力的建立速度比 ABS 制动压力的建立速度要慢。驱动轮的制动力可直接使用 ABS 的液压系统进行控制，只需在 ABS 的液压控制系统中增设一些 ASR 液压调节装置即可。

防滑转液压控制系统是在防抱死制动系统的基础上，增设液压调节器（即 ASR 执行器）、ASR 液压泵和蓄压器等构成。

防滑转电子控制系统控制部件的安装位置如图 1.4-40 所示，其主要由轮速传感器、ASR ECU、发动机副节气门位置传感器及其控制步进电动机、ASR 液压调节器、各种控制开关、继电器和指示灯等组成。四只轮速传感器为 ABS 和 ASR 公用，ABS ECU 与 ASR ECU 组合为一体，称为 ABS/ASR ECU。在 ABS 的基础上，增设了 ASR 执行器、发动机副节气门控制步进电动机以及 ASR 控制开关和显示灯等。其中，副节气门控制步进电动机和 ASR 液压调节器是电子控制系统的执行元件。

2.9.2 防滑转控制系统的控制过程

丰田汽车发动机的输出转矩利用步进电动机调节副节气门开度进行调节，驱动轮的制动力利用 ASR 执行器结合 ABS 进行控制。在制动驱动轮产生差速作用（即驱动轮转速不同，两个半轴产生差动作用）时，控制驱动轮的制动力可使驱动力得到充分发挥，从而改善行驶稳定性和转向性能，这种作用对于两侧车轮所处路面的附着系数不同时更为显著。因此这种控

制系统特别适用于装备燃油喷射式发动机和 ABS 的前轮驱动轿车。

当发动机起动后，ABS/ASR ECU 根据轮速传感器产生的车轮转速信号以及参考车速，计算确定驱动轮的滑移率和滑转率。当 ABS/ASR ECU 判定驱动轮的滑转率超过设定门限值时，ABS/ASR ECU 就会控制发动机输出转矩和对驱动轮施加制动来避免发生滑转现象。

控制发动机输出转矩时，ABS/ASR ECU 首先向发动机与自动变速器 ECU 发出控制指令，然后再由发动机与自动变速器 ECU 向副节气门执行器（步进电动机）发出控制指令进行控制。当 ASR 起作用时，步进电动机步进转动时，其轴一端的驱动齿轮就驱动节气门轴上的扇形齿轮转动，使节气门的开度减小（副节气门在 ASR 不起作用时处于全开状态），即使主节气门开度不变，发动机的进气量也会因副节气门开度减小而减小，从而使发动机输出转矩减小，驱动轮的驱动力随之减小。

控制驱动轮的驱动力时，ABS/ASR ECU 直接向 ABS 和 ASR 的液压调节装置发出控制指令，通过调节制动液压力降低、保持和升高来调节滑转率。当滑转率降低到设定值后，ABS/ASR ECU 便发出减少或停止制动的指令，从而达到防止驱动轮滑转之目的。当驱动轮再次滑转，其滑转率超出设定值范围时，ABS/ASR ECU 和发动机与自动变速器 ECU 再次发出控制指令，重新开始控制循环，直到滑转率减小到设定值范围为止。

在 ASR 处于防滑转控制过程中，如果驾驶员踩下制动踏板进行制动，ASR 会自动退出控制状态，不会影响制动过程正常进行。

2.10 防抱死制动系统故障自诊断测试

汽车主动安全电子控制系统故障诊断与检修方法基本相同，下面以国产轿车使用较多的 MK20-I 型 ABS 为例，说明其故障诊断与检修方法。

2.10.1 ABS 故障自诊断测试条件

2.10.1.1 ABS 自诊断测试功能

MK20-I 型 ABS 与发动机燃油喷射系统一样，具有故

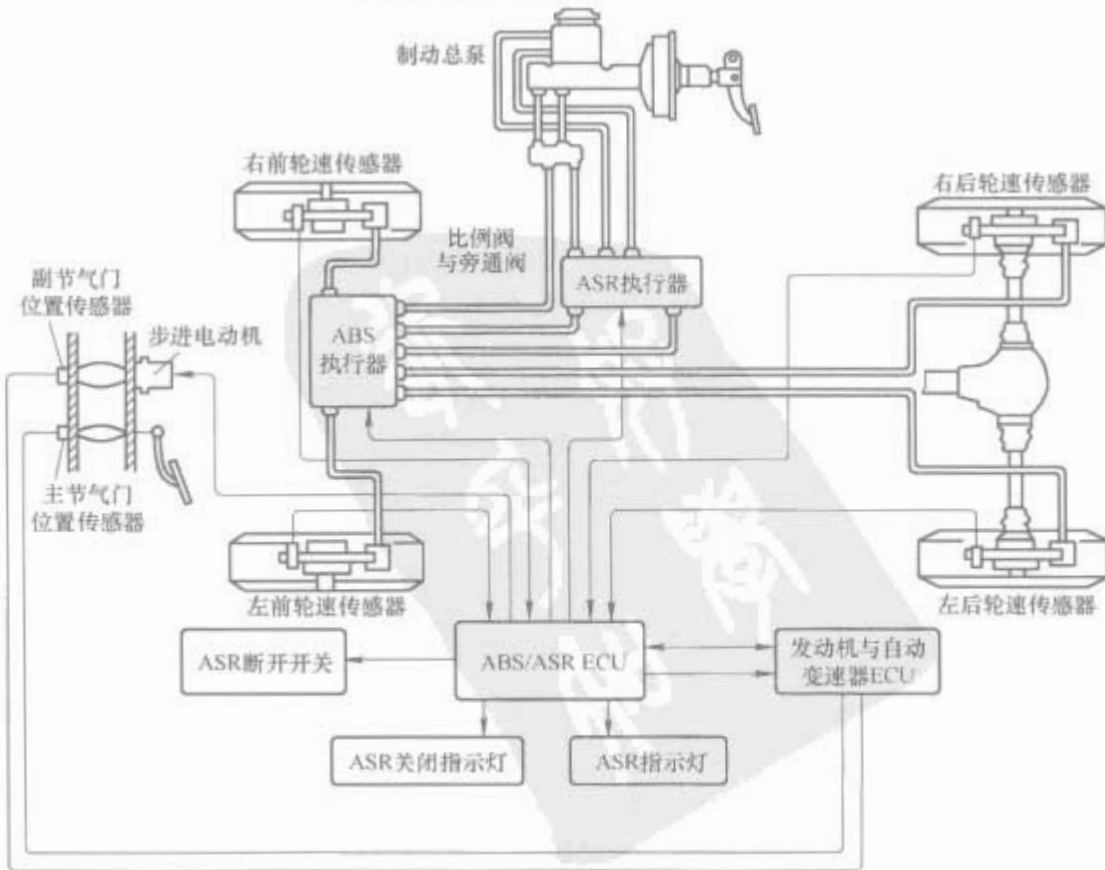


图 1.4-39 丰田汽车 ABS/ASR 控制系统组成简图

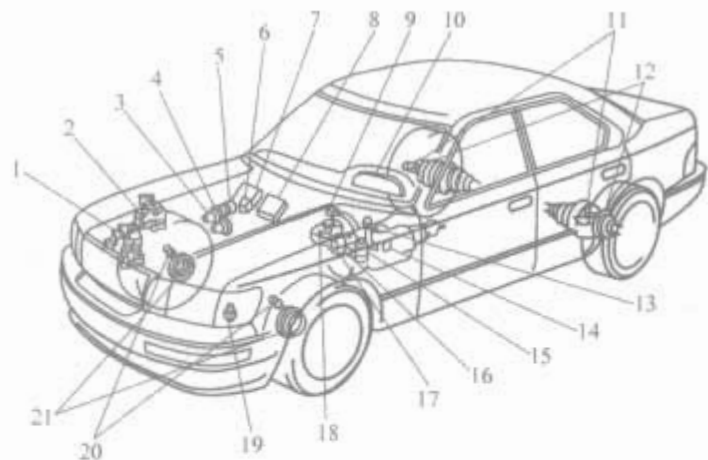


图 1.4-40 丰田汽车 ABS/ASR 控制部件安装位置
1—ABS 液压调节器；2—ASR 液压调节器；3—副节气门位置传感器；4—主节气门位置传感器；5—副节气门位置控制步进电动机；6—副节气门步进电动机继电器；7—ABS/ASR ECU；8—发动机与自动变速器 ECU；9—防滑转控制系统关闭开关；10—防滑转控制指示灯与防滑转控制系统关闭指示灯；11—后轮速传感器；12—后轮速传感器信号转子；13—停车灯开关；14—空挡起动开关；15—防滑转控制液压泵；16—防滑转控制液压泵继电器；17—防滑转控制蓄压器；18—制动液位警告灯开关；19—防滑转控制主继电器；20—前轮速传感器；21—前轮速传感器信号转子

障检测与自诊断测试功能。在组合仪表台上设有 ABS 指示灯，每次行车前接通点火开关时，ABS 将进行自检状态。

在自检过程中，ABS 指示灯发亮，如果 ABS 指示灯持续发亮大约 2s 后熄灭，说明 ABS 正常；如果 ABS 指示灯一直发亮，说明 ABS 有故障。自检过程将一直持续到汽车行驶过程中，因为某些故障只能在行驶过程中才能识别出来。在自检过程中，能够听到继电器动作和电动回液泵起动的声音，也能感觉到制动踏板轻微的振动。

汽车行驶过程中，当 ABS 发生故障时，ABS ECU 立即切断控制电路，中断 ABS 的防抱死制动功能，但是仍然保持常规制动功能，并接通 ABS 指示灯电路，使 ABS 指示灯发亮指示。与此同时，控制系统还将故障编成代码存储在存储器（RAM）中，以供检测维修调用。利用故障诊断仪 V. A. G1551 或 V. A. G1552 可以进行自诊断测试。

2.10.1.2 ABS 自诊断测试注意事项

在对 MK20-1 型 ABS 进行自诊断测试时，需要注意以下几点：

- (1) 自诊断测试只能在汽车静止并接通点火开关（或起动发动机运转）时进入。如果车速大于 2.5km/h，则无法进入自诊断；如果车速大于 20km/h，自诊断程序将自动中断。
- (2) 在进行自诊断过程中，ABS 无调节功能，此时 ABS 指示灯 K47 发光。
- (3) 自诊断功能不仅可以读取和清除存储器中的故障信息，还可以提供电控单元识别和读取测量数据块等附加功能。
- (4) 自诊断的第一个检测步骤必须是读取故障存储器中的故障信息。
- (5) 从 ABS ECU 上拔下线束插头时，切勿开动汽车。只有当点火开关断开时，才能拔下或插上 ABS 控制部件的线束插头。
- (6) 只有在更换电动回液泵和电磁阀继电器时，才允许拧开液压调节器固定螺栓。
- (7) ABS 中的故障是通过 ABS 指示灯 K47 发光显示。因为某些故障只有在汽车行驶中才能被识别，所以在自诊断测试后要通过试车来检查系统的功能。试车时应在 30s 时间

内以大于 60km/h 的车速行驶，并且至少进行一次紧急制动，以使 ABS 投入工作。

2.10.1.3 ABS 自诊断测试条件

- (1) 所有轮胎的型号和规格必须相同，且轮胎气压符合标准规定。
- (2) 制动灯开关和制动灯技术状态良好。
- (3) 制动液压系统无泄漏（观察液压电控单元、制动泵等有无泄漏）。
- (4) 转速传感器安装位置正常。
- (5) 所有熔丝正常，并按电路图规定连接好。
- (6) 液压电控单元上回液泵电动机 V64 的搭铁线连接正常。
- (7) ABS ECU 线束插头连接可靠并锁紧。
- (8) 当故障检测仪 V. A. G1551 工作时，测试盒 V. A. G1598 不应同防抱死制动系统的电控单元连接相连。
- (9) 供电电压正常（不低于 10.5V）。

2.10.2 ABS 故障自诊断测试过程

2.10.2.1 读取故障代码

- (1) 按前述发动机自诊断测试方法连接故障测试仪。
- (2) 接通电源进入诊断测试程序。首先接通点火开关或起动发动机怠速运行（如故障导致发动机不能起动，则接通点火开关），然后接通故障诊断仪电源开关。此时故障诊断仪进入车辆系统测试模式，显示如图 1.4-41 所示。



图 1.4-41 进入车辆系统测试模式时显示的信息

- (3) 输入防抱死制动电子控制系统的地址指令“03”，并单击 Q 键确认，地址指令代表的系统名称就会出现在屏幕上（单击 C 键可以改变输入指令）。ECU 确认后显示如图 1.4-42 所示的 ECU 信息（注意：只有在点火开关接通或发动机运转时，才能显示控制器的编号和代码）。需要特别指出的是：由于汽车使用的电控单元以及诊断仪使用的程序卡型号不同，各项功能所显示和打印的内容会有所不同。



图 1.4-42 输入电控单元地址代码“03”后显示的信息
3A0 907 379—电控单元零件编号；ABS—防抱死制动系统；ITT—公司名称；AE20G1V—软件版本

- (4) 单击“→”键，直到诊断仪屏幕上显示输入“功能选择代码”，如图 1.4-43 所示。



图 1.4-43 单击“→”键后显示的功能选择信息

- (5) 输入功能选择代码 01、02、…、08，并单击 Q 键确认，即可进入所选择功能的测试。读取故障代码时，输入功能选择代码“02”，并单击 Q 键确认，屏幕上将首先显示存储故障的数量或显示“没有故障被识别”，显示



图 1.4-44 输入功能选择代码“02”且有故障代码时显示的信息

如图 1.4-44 所示。如果没有故障代码，显示屏显示如图 1.4-45 所示。



图 1.4-45 输入功能选择代码“02”
但无故障代码时显示的信息

如果使用 V. A. G1551 型测试仪，单击 Print 键接通打印机（Print 键上的指示灯将发亮），存储的一个或多个故障

代码及其文字说明将按存储故障的顺序打印出来。为了使打印输出的故障代码与维修手册印制的故障代码表一一对应，故障代码均按 5 位数字排列，MK20-I 型 ABS 的故障代码见表 1.4-5。在显示屏下面一行显示的是故障类型，如果故障类型后面显示有“/SP”字样，表明该故障为偶然性故障。

故障代码及其类型显示完毕，显示屏将显示输入“功能选择代码”，此时输入“功能选择代码”，可继续进行诊断测试。

表 1.4-5		MK20-I 型防抱死制动系统 ABS 故障代码	
V. A. G1551 或 V. A. G1552 显示结果		可 能 的 故 障 原 因	故 障 排 除 方 法
代码	显示内容及译文		
	No fault recognised (未发现故障)	如果是在维修完毕后进行的测试，则结束自诊断。如果 ABS 不能正常工作，则按下述步骤进行检查 (1) 以大于 20km/h 的车速进行紧急制动试车 (2) 再次用故障诊断仪读取故障代码，如果仍无故障代码显示，则需对电气系统进行全面检查	
00668	Vehicle voltage terminal 30 Signal outside tolerance (30 号电源端子电压信号超差)	电源线路、连接插头或熔断故障	检查 ABS 电源线路、熔断和连接器
00283	Speed sensor front left-G47 (左前轮速传感器 G47 故障)	(1) 左前轮速传感器 G47 与 ABS ECU 之间的线路对正极或对地断路、短路 (2) 信号转子受到污染或损坏 (3) 车轮轴承间隙过大 (4) 轮速传感器 G47 安装不正确 (5) 轮速传感器 G47 损坏	(1) 检查 G47 与 ABS ECU 之间的线束及连接器 (2) 检查传感器 G47 与齿圈之间的间隙 (3) 选择“读取测量数据块”代码 08 进行检查
00285	Speed sensor front right-G45 (右前轮速传感器 G45 故障)	(1) 右前轮速传感器 G45 与 ABS ECU 之间的线路对正极或对地断路、短路 (2) 信号转子受到污染或损坏 (3) 车轮轴承间隙过大 (4) 轮速传感器 G45 安装不正确 (5) 轮速传感器 G45 损坏	(1) 检查 G45 与 ABS ECU 之间的线束及连接器 (2) 检查传感器 G45 与齿圈之间的间隙 (3) 选择“读取测量数据块”代码 08 进行检查
00287	Speed sensor rear right-G44 (右后轮速传感器 G44 故障)	(1) 右后轮速传感器 G44 与 ABS ECU 之间的线路对正极或对地断路、短路 (2) 信号转子受到污染或损坏 (3) 车轮轴承间隙过大 (4) 轮速传感器 G44 安装不正确 (5) 轮速传感器 G44 损坏	(1) 检查 G44 与 ABS ECU 之间的线束及连接器 (2) 检查传感器 G44 与齿圈之间的间隙 (3) 选择“读取测量数据块”代码 08 进行检查
00290	Speed sensor rear left-G46 (左后轮速传感器 G46 故障)	(1) 左后轮速传感器 G46 与 ABS ECU 之间的线路对正极或对地断路、短路 (2) 信号转子受到污染或损坏 (3) 车轮轴承间隙过大 (4) 轮速传感器 G46 安装不正确 (5) 轮速传感器 G46 损坏	(1) 检查 G46 与 ABS ECU 之间的线束及连接器 (2) 检查传感器 G46 与齿圈之间的间隙 (3) 选择“读取测量数据块”代码 08 进行检查
01276	ABS hydraulic pump-V64 Signal outside tolerance (ABS 电动回液泵 V64 信号超差)	(1) 电动回液泵 V64 与 ABS ECU 之间的线路对正极或对地断路、短路 (2) 电动回液泵故障	(1) 检查 V64 与 ABS ECU 之间的线束及连接器 (2) 选择“执行元件测试”代码 03 进行检查
66535	Control unit (电控单元故障 [如果同时显示电动回液泵 V64 有故障，则应先排除回液泵故障])	(1) ABS ECU 搭铁线断路或接触不良 (2) ABS ECU 故障	(1) 检查 ABS ECU 搭铁线是否断路或接触不良 (2) 更换 ABS ECU
01044	Control unit incorrectly coded (电控单元编码不正确)	ABS ECU 的 25 端子线束插座上端子“6”与“22”连接的编码跨接线断路或搭铁	检查 ABS ECU 编码跨接线

续表

V. A. G1551 或 V. A. G1552 显示结果		可 能 的 故 障 原 因	故 障 排 除 方 法
代码	显示内容及译文		
01130	ABS operation Signal outside tolerance (ABS 工作信号超差)	有外界干扰信号 (高频发射信号, 如点火信号) 干扰 ABS 工作	(1) 检查 ABS 线路是否与点火线路搭接 (2) 清除故障代码 (3) 以大于 20km/h 的车速进行紧急制动试车 (4) 再次读取故障代码

2. 10. 2. 2 清除故障代码

故障排除后应及时清除故障代码, 否则再次读取故障代码时, 此次故障代码会一并调出, 影响工作效率。

如果 ECU 电源切断 (如控制器插头被拔下) 或蓄电池极柱上的电缆端子被拆下, 那么故障代码存储器中存储的故障信息将被清除。

利用故障诊断仪 V. A. G1551 或 V. A. G1552 清除 ABS 故障代码的操作程序如下:

(1) 按读取故障代码的操作程序进入诊断测试“功能选择”。当诊断仪屏幕上显示输入“功能选择代码”时 (见图 1. 4-46), 输入“读取故障代码”的功能选择代码“02”, 并单击 Q 键确认。



图 1. 4-46 单击“→”键后显示的功能选择信息

(2) 单击“→”键, 直到显示出所有的故障代码, 并在屏幕上显示输入“功能选择代码”时, 输入“清除故障代码”的功能选择代码“05”, 并单击 Q 键确认, 显示如图 1. 4-47 所示。



图 1. 4-47 输入功能选择代码“05”时显示的信息

(3) 单击“→”键, 直到故障代码被清除, 并在屏幕上显示输入“功能选择代码”时, 输入“结束输出”功能选择代码“06”, 并单击 Q 键确认。

(4) 重新试车并再次读取故障代码, 不得有故障代码显示。

2. 10. 3 ABS 故障的排除方法

当 ABS 出现故障或感到 ABS 工作不正常时, 可通过目视检查以下内容:

- (1) 手制动是否完全释放。
- (2) 制动液有无渗漏, 制动液液面是否符合规定高度。
- (3) ABS 熔断器、继电器是否完好, ABS ECU 连接器插接是否牢固。
- (4) 控制部件 (轮速传感器、电磁阀、电动回液泵、压力指示开关和压力控制开关等) 连接器插头与插座连接是否良好。
- (5) ABS ECU、压力调节器的搭铁线是否可靠搭铁。
- (6) 电源 (蓄电池和交流发电机) 电压是否符合规定。
- (7) 读取故障代码并根据代码指示情况进行检修。对于故障诊断仪 V. A. G1551 或 V. A. G1552 能够检测到的故障, 可根据故障代码表建议的检测项目有的放矢的进行检查; 对于故障诊断仪检测不到的故障, 必须对电气系统进行全面检查。

3 电子控制被动安全系统

汽车被动安全系统的功用是减轻事故导致的伤害程度, 采用的主要有安全气囊控制系统 (SRS) 和座椅安全带控制系统 (STTS)、座椅安全带、护膝垫、两节或三节式转向柱等。

3. 1 安全气囊系统组成与分类

安全气囊系统的确切名称是辅助防护系统 (Supplemental Restraint System) 或辅助防护安全气囊系统 (Supplemental Restraint Safety Air Bag System), 英文缩写为 SRS。

辅助防护系统 SRS 是座椅安全带的辅助装置, 只有在使用安全带的条件下, 该系统才能充分发挥保护驾驶员和乘客的作用。由于辅助防护系统 SRS 在汽车发生碰撞时能够起到安全防护作用, 因此, 人们通常都将其称为安全气囊系统, 并用英文缩写 SRS 表示。

3. 1. 1 汽车碰撞导致人体遭受伤害的原因

当汽车发生碰撞时, 汽车与汽车或汽车与障碍物之间的碰撞称为一次碰撞。一次碰撞后, 汽车速度将急剧变化, 驾驶员和乘客就会受到惯性力的作用而向前运动, 并与车内的转向盘、挡风玻璃或仪表台等构件发生碰撞, 这种碰撞称为二次碰撞。在车辆事故中, 导致驾驶员和乘员遭受伤害的主要原因是二次碰撞。

碰撞分为正面碰撞和侧面碰撞两种。当汽车发生正面碰撞时, 在惯性力的作用下, 驾驶员面部或胸部可能与转向盘和挡风玻璃发生二次碰撞, 前排乘客可能与仪表台发生二次碰撞, 后排乘客可能与前排座椅发生二次碰撞; 当汽车遭受侧面碰撞时, 驾驶员和乘客可能与车门、车门玻璃或车门立柱发生二次碰撞。车速越高, 惯性力就越大, 遭受伤害的程度也就越大。

3. 1. 2 安全气囊系统的功用

安全气囊系统的功用是: 当汽车遭受碰撞导致减速度急剧变化时, 气囊迅速膨胀, 在驾驶员、乘客与车内构件之间迅速铺垫一个气垫, 利用气囊排气节流的阻尼作用来吸收人体惯性力产生的动能, 从而减轻人体遭受伤害的程度。

正面气囊的主要功用是保护驾驶员和乘员的面部与胸部, 如图 1. 4-48 所示, 侧面气囊的主要功用是保护驾驶员和乘员的头部与腰部。

3. 1. 3 安全气囊系统的组成

各型汽车安全气囊系统采用控制部件的结构、数量和安装位置各有不同, 但其基本组成大致相同, 主要由左前碰撞传感器、右前碰撞传感器、安全气囊电控单元 (SRS ECU)、气囊组件和指示灯等组成, 控制部件安装位置如图 1. 4-49 所示。控制电路如图 1. 4-50 所示, 由备用电源电路、故障记忆电路、故障诊断与监测电路、点火引爆电路等组成。

3. 1. 4 安全气囊系统的分类

按总体结构不同, 安全气囊系统可分为机械式 SRS 和

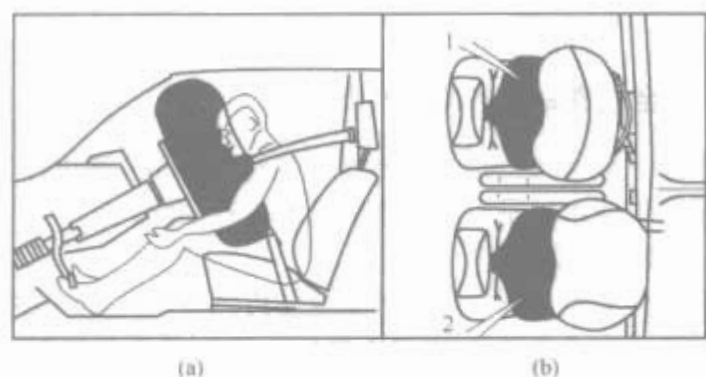


图 1.4-48 汽车遭受正面碰撞时 SRS 的作用情况
(a) 驾驶席气囊；(b) 驾驶席与乘客席气囊
1—驾驶员；2—前排乘客

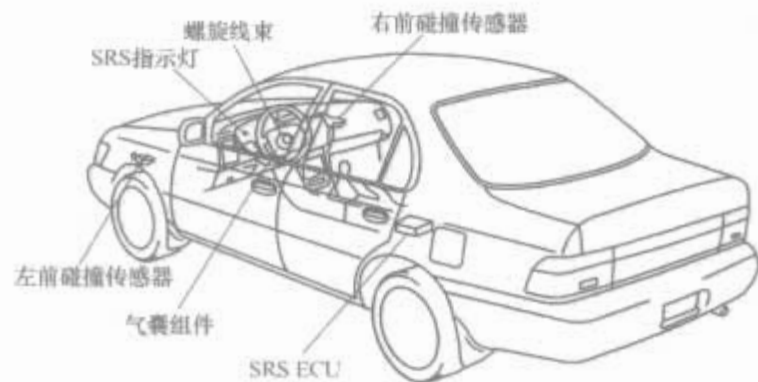


图 1.4-49 SRS 零部件安装位置

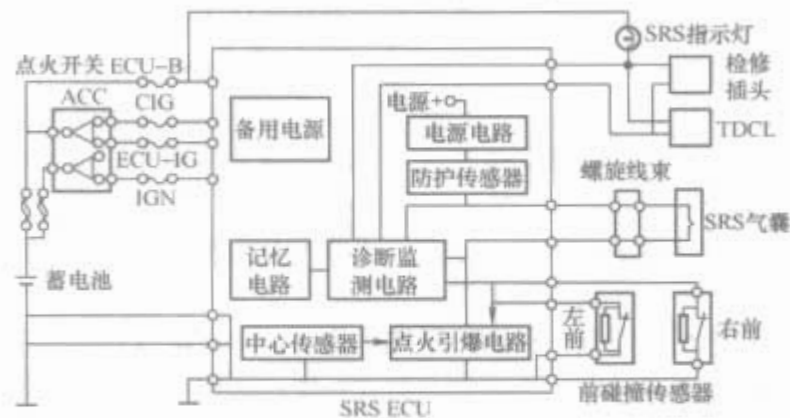


图 1.4-50 丰田轿车 SRS 电路组成框图

电子式 SRS 两大类。机械式 SRS 已经淘汰，汽车装备的均为电子控制式气囊系统。

按电子式 SRS 功能不同，可分为正面 SRS 和侧面 SRS 两大类；按气囊数量不同可分为单 SRS、双 SRS 和多 SRS。

单 SRS 只装备驾驶席气囊。20 世纪 90 年代以前生产的汽车基本上都装备单 SRS。

双 SRS 装备有驾驶席和前排乘客席两个气囊，20 世纪 90 年代后生产的大多数轿车都装备了双 SRS。

装备 3 个或 3 个以上气囊的 SRS 称为多 SRS。例如，北京现代汽车公司生产的伊兰特轿车装备有驾驶席正面和左侧气囊、前排乘员席正面和右侧气囊共 4 个气囊，一汽马自达 6 轿车装备有驾驶席正面和左侧气囊、前排乘员席正面和右侧气囊、驾驶席与前后排乘员席左右两侧共 6 个气囊。在同一辆汽车上，无论气囊数量多少，均可采用一个 SRS ECU 控制。

3.2 安全气囊系统的控制过程

3.2.1 安全气囊系统的控制原理

当汽车遭受正面碰撞和侧面碰撞时，安全气囊系统的控制原理完全相同。下面以图 1.4-51 所示正面碰撞为例，说明安全气囊系统控制原理。

当汽车遭受前方一定角度范围内的碰撞时，安装在汽车前部和 SRS ECU 内部的碰撞传感器都会检测到汽车突然减

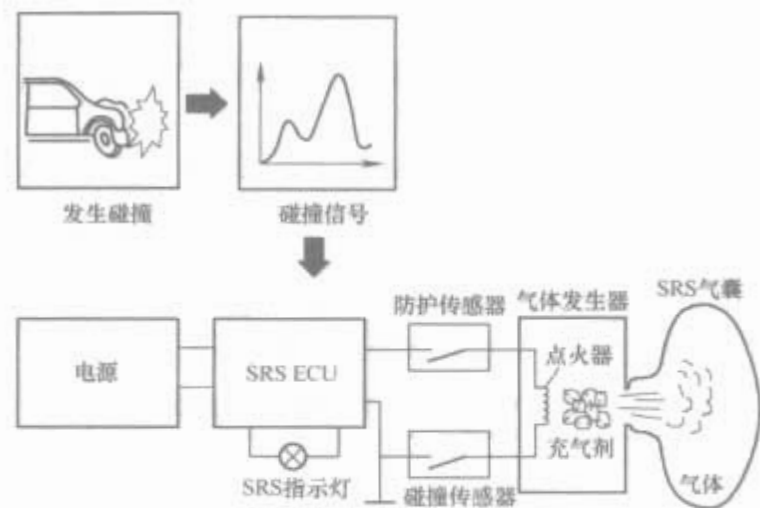


图 1.4-51 安全气囊系统的控制原理

速的信号，并将信号输入 SRS ECU，以便判断是否发生碰撞。当汽车遭受碰撞且减速度达到设定阈值时，SRS ECU 发出控制指令将气囊组件中的点火器（电雷管）电路接通，电雷管引爆使点火剂（引药）受热爆炸（即电热丝通电发热引爆炸药）。点火剂引爆时，迅速产生大量热量，使充气剂（叠氮化钠固体药片）受热分解并释放出大量氮气充入气囊，气囊便冲开气囊组件上的装饰盖并鼓向驾驶员和乘客，使驾驶员和乘客面部和胸部压靠在充满气体的气囊上，在人体与车内构件之间铺垫一个气垫，将人体与车内构件之间的碰撞变为弹性碰撞，通过气囊产生变形和排气节流来吸收人体碰撞产生的动能，从而达到保护人体之目的。

3.2.2 安全气囊系统的控制过程

根据德国博世公司在奥迪轿车上的试验研究表明：当汽车以车速 50km/h 与前面障碍物碰撞时，安全气囊的动作时序如图 1.4-52 所示。

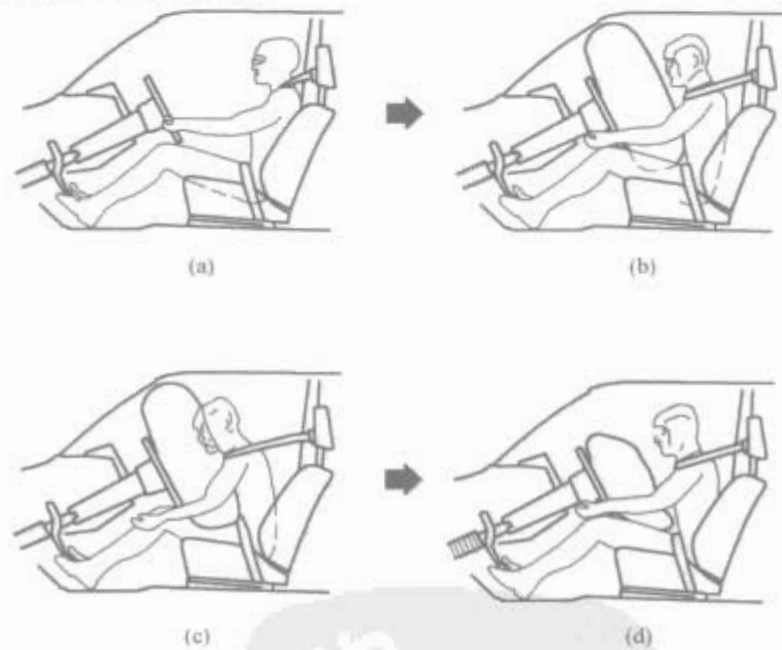


图 1.4-52 安全气囊动作时序

(a) 10ms 后；(b) 40ms 后；(c) 60ms 后；(d) 110ms 后

(1) 碰撞约 10ms 后，SRS 达到引爆极限，点火器引爆点火剂并产生大量热量，使充气剂受热分解，驾驶员尚未动作，如图 1.4-52 (a) 所示。

(2) 碰撞约 40ms 后，气囊完全充满，体积最大，驾驶员向前移动，安全带斜系在驾驶员身上并拉紧，部分冲击能量已被吸收，如图 1.4-52 (b) 所示。

(3) 碰撞约 60ms 后，驾驶员头部及身体上部压向气囊，气囊的排气孔在气体和人体压力作用下排气节流吸收人体与气囊之间弹性碰撞产生的动能，如图 1.4-52 (c) 所示。

(4) 碰撞约 110ms 后，大部分气体已从气囊逸出，驾驶员身体上部回到座椅靠背上，汽车前方恢复视野，如图

1.4-52 (d) 所示。

(5) 碰撞约 120ms 后，碰撞危害解除，车速降低直至为零。

由此可见，从开始充气到完全充满约为 30ms；从汽车遭受碰撞开始到气囊收缩为止，所用时间仅为 120ms 左右，而人们眨一下眼皮所用时间约为 200ms 左右。因此，安全气囊在碰撞过程中动作时间极短，气囊动作状态和经历时间无法用肉眼确认。安全气囊动作过程与经历时间之间的关系见表 1.4-6。

表 1.4-6 安全气囊动作过程与经历时间的关系						
碰撞之后 经历时间 (ms)	0	10	40	60	110	120
SRS 气囊 动作状态	遭受碰撞	点火引爆、 开始充气	气囊充满、 人体前移	排气节流、 吸收动能	人体复位、 恢复视野	危害解除、 车速降零

3.2.3 安全气囊的有效范围

汽车安全气囊系统并非在所有碰撞情况下都能起作用。如图 1.4-53 所示，正面 SRS 只有在汽车正前方或斜前方 ±30°角范围内发生碰撞，纵向减速度达到设定阈值，且防护传感器和任意一只前碰撞传感器接通时，才能引爆气囊充气。在下列条件之一的情况下，正面气囊不会引爆充气。

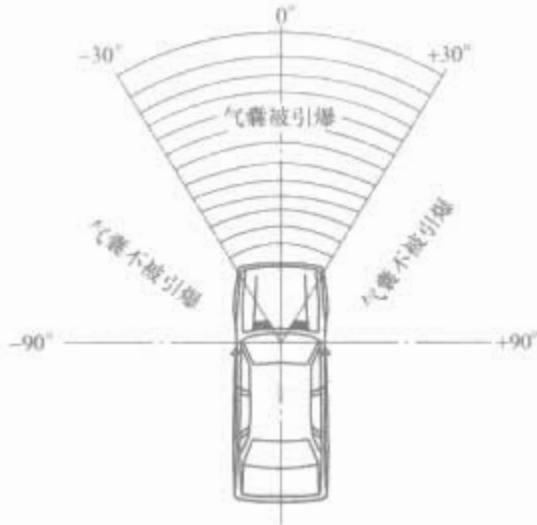


图 1.4-53 正面碰撞时 SRS 的有效范围

- (1) 汽车遭受侧面碰撞超过斜前方 ±30°时。
- (2) 汽车遭受横向碰撞时。
- (3) 汽车遭受后方碰撞时。
- (4) 汽车发生绕纵向轴线侧翻时。
- (5) 纵向减速度未达到设定阈值时。
- (6) 所有前碰撞传感器都未接通或 SRS ECU 内部的防护传感器未接通时。
- (7) 汽车正常行驶、正常制动或在路面不平的道路条件下行驶时。

3.2.4 减速度阈值的设定

减速度阈值根据安全气囊系统的性能设定，不同车型 SRS 的减速度阈值有所不同。在美国，因为 SRS 是按驾驶员不佩戴座椅安全带来设计，气囊体积大、充气时间长，所以 SRS 应在较低的减速度阈值时引爆气囊，即汽车以较低车速 (20km/h 左右) 行驶而发生碰撞时，SRS 就应引爆。在日本和欧洲，由于 SRS 是按驾驶员佩戴座椅安全带来设计，气囊体积小、充气时间短，所以设定的减速度阈值较高，汽车以较高车速 (30km/h 左右) 行驶而发生碰撞时，SRS 才能引爆气囊充气。

侧面气囊只有在汽车遭受侧面碰撞且横向加速度达到设定阈值时，才能引爆气囊充气，且不会给正面气囊

充气。

3.3 安全气囊系统的结构特点

安全气囊系统由碰撞传感器、电控单元和气囊组件三部分组成。气囊组件是安全气囊系统的执行元件。

3.3.1 碰撞传感器

碰撞传感器实际上是一种减速度传感器，其功用是将碰撞信号输入安全气囊系统和座椅安全带收紧系统电控单元 SRS ECU，以便 SRS ECU 确定是否引爆气囊点火器和安全带收紧点火器。

3.3.1.1 碰撞传感器分类

按传感器用途不同，碰撞传感器可分为碰撞信号传感器和碰撞防护传感器两种类型。

碰撞信号传感器又称为碰撞烈度 (激烈程度) 传感器，安装在汽车左前与右前翼子板内侧、两侧前照灯支架下、发动机散热器 (水箱) 支架左右两侧、左右仪表台下等。

碰撞防护传感器又称为安全传感器或保险传感器，简称防护传感器，一般都安装在 SRS ECU 内部。防护传感器和碰撞信号传感器的结构原理完全相同，其唯一区别在于设定的减速度阈值有所不同。换句话说，一只碰撞传感器既可用作碰撞信号传感器，也可用作碰撞防护传感器，但是必须重新设定其减速度阈值。设定减速度阈值的原则是碰撞防护传感器的减速度阈值比碰撞信号传感器的减速度阈值稍小。当汽车以 40km/h 左右的速度撞到一辆静止或同样大小的汽车上或以 20km/h 左右的速度迎面撞到一个不可变形的障碍物上时，减速度就会达到碰撞信号传感器设定的阈值，传感器就会动作。

按传感器结构不同，碰撞传感器可分为机电结合式、水银开关式和电子式三种类型。

机电结合式是一种利用机械机构运动 (滚动或转动) 来控制电器触点动作，再由触点断开与闭合来控制气囊点火器电路接通与切断的传感元件，常用的有滚球式、滚轴式和偏心锤式三种碰撞传感器。

3.3.1.2 滚球式碰撞传感

滚球式碰撞传感器又称为偏压磁铁式碰撞传感器，结构如图 1.4-54 所示，主要由铁质滚球、永久磁铁、导缸、固定触点和壳体等组成。

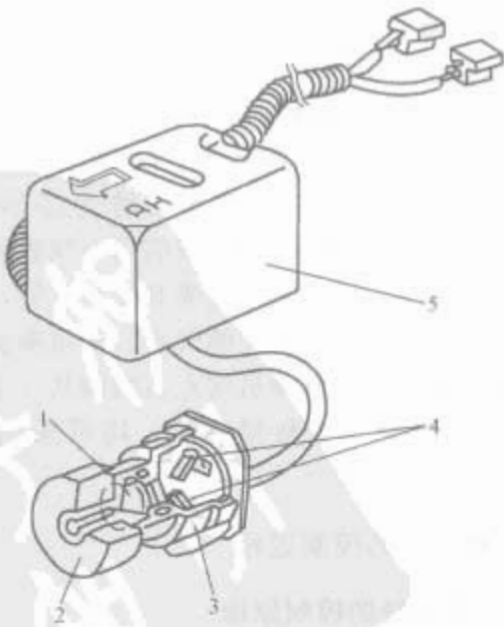


图 1.4-54 滚球式碰撞传感器的结构

1—滚球；2—磁铁；3—导缸；
4—触点；5—壳体

两个触点分别与传感器引线端子连接。滚球用来感测

减速度大小，在导缸内可移动或滚动。壳体上印制有箭头标记，箭头方向与传感器结构有关，有的规定指向汽车前方（如丰田凌志 LS400 型轿车），有的规定指向汽车后方。因此，在安装传感器时，箭头方向必须符合使用说明规定。

滚球式碰撞传感器工作原理如图 1.4-55 所示。当传感器处于静止状态时，在永久磁铁磁力作用下，导缸内的滚球被吸向磁铁，两个触点与滚球分离，传感器电路处于断开状态，如图 1.4-55（a）所示。

当汽车遭受碰撞且减速度达到设定阈值时，滚球产生的惯性力将大于永久磁铁的电磁吸力。滚球在惯性力作用下就会克服磁力沿导缸向两个固定触点运动并将固定触点接通，如图 1.4-55（b）所示。当传感器用作碰撞信号传感器时，

固定触点接通则将碰撞信号输入安全气囊系统电控单元 SRS ECU；当传感器用作碰撞防护传感器时，则将点火器电源电路接通。

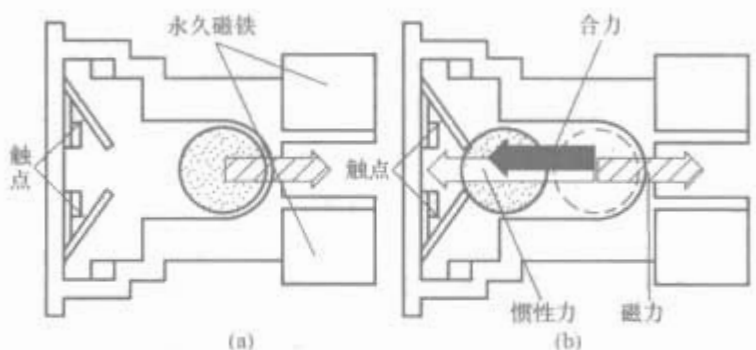


图 1.4-55 滚球式碰撞传感器的工作原理
(a) 静止状态；(b) 工作状态

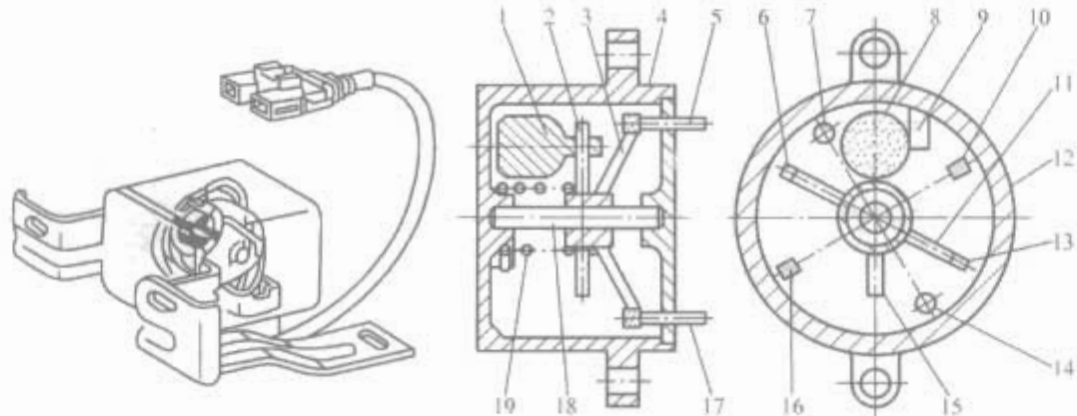


图 1.4-56 偏心锤式碰撞传感器的结构
1、8—偏心锤；2、15—锤臂；3、11—转动触点臂；4、12—壳体；5、7、14、17—固定触点引线端子；6、13—转动触点；9—挡块；10、16—固定触点；18—传感器轴；19—复位弹簧

3.3.1.3 偏心锤式碰撞传感器

偏心锤式碰撞传感器又称为偏心转子式碰撞传感器。丰田、马自达汽车 SRS 采用了这种传感器，其结构如图 1.4-56 所示，主要由偏心锤 1 与 8、偏心锤臂 2 与 15、转动触点臂 3 与 11、转动触点 6 与 13、固定触点 10 与 16、复位弹簧 19、挡块 9、壳体 4 与 12 等组成。

转子总成由偏心锤 1、转动触点臂 3 及转动触点 6 与 13 组成，安装在传感器轴 18 上。偏心锤偏心安装在偏心锤臂上。转动触点臂 3 与 11 两端固定有触点 6 与 13，触点随触点臂一起转动。两个固定触点 10 与 16 绝缘固定在传感器壳体上，并用导线分别与传感器接线端子 7、14 连接。

偏心锤式传感器的工作原理如图 1.4-57 所示。当传感器处于静止状态时，在复位弹簧弹力作用下，偏心锤与挡块保持接触，转子总成处于静止状态，转动触点与固定触点断开，如图 1.4-57（a）所示，传感器电路处于断开状态。

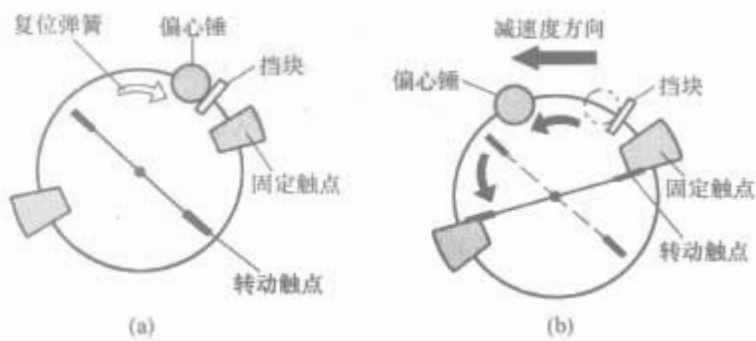


图 1.4-57 偏心锤式碰撞传感器工作原理
(a) 静止状态；(b) 工作状态

当汽车遭受碰撞且减速度达到设定阈值时，偏心锤产生的惯性力矩将大于复位弹簧的弹力力矩，转子总成在惯性力矩作用下克服弹簧力矩沿逆时针方向转动一定角度，同时带

动转动触点臂转动，并使转动触点与固定触点接触，如图 1.4-57（b）所示。当传感器用作碰撞信号传感器时，转动触点与固定触点接触则将碰撞信号输入 SRS ECU；当传感器用作碰撞防护传感器时，则将点火器电源电路接通。

3.3.1.4 水银开关式碰撞传感器

水银开关式碰撞传感器利用水银具有良好的导电特性而制成的，结构如图 1.4-58（a）所示，主要由水银、壳体、电极和密封螺塞组成。

水银开关式碰撞传感器的工作原理如图 1.4-58（b）所示，当传感器处于静止状态时，水银在其重力作用下处于图 1.4-58（a）所示位置，传感器的两个接线端子处于断开状态。当汽车发生碰撞且减速度达到设定阈值时，水银产生的惯性力在其运动方向的分力将克服其重力的分力而将水银抛向传感器电极，使两个电极接通。当传感器用作碰撞信号传感器时，两个电极接通则将碰撞信号输入 SRS ECU；当传感器用作碰撞防护传感器时，则将点火器电源电路接通。

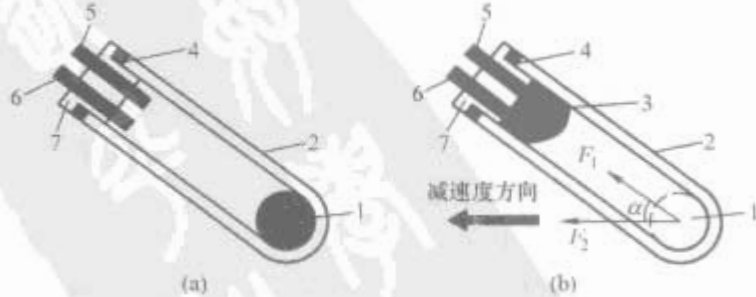


图 1.4-58 水银开关式传感器结构
(a) 静止状态；(b) 工作状态

1—水银（静态位置）；2—壳体；3—水银（动态位置）；4—密封圈；5—电极（接点火器）；6—电极（接电源）；7—密封螺塞； F_1 —水银运动方向分力； F_2 —惯性力； α —水银运动方向与水平方向之间的夹角

3.3.2 安全气囊系统电控单元

安全气囊系统电控单元 (SRS ECU), 是安全气囊系统的核心部件, 其安装位置依车型而异。当防护传感器与 SRS ECU 组装在一起时, SRS ECU 应当安装在汽车纵向轴线上。SRS ECU 的结构有简有繁, 福特林肯·城市轿车 SRS ECU 的内部结构如图 1.4-59 所示, 主要由专用中央处理单元 CPU、备用电源电路、稳压电路、信号处理电路、保护电路、点火电路和监测电路等组成。

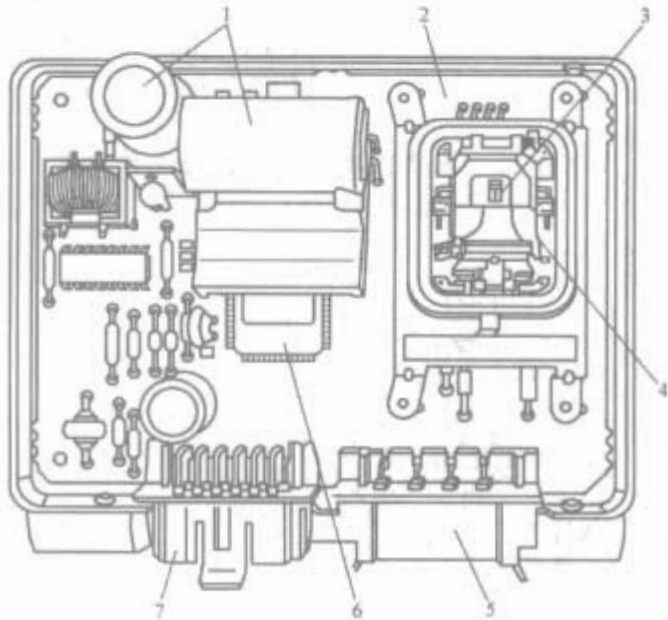


图 1.4-59 林肯城市轿车 SRS ECU 的结构
1—电容器; 2—防护传感器; 3—触点; 4—滚轴;
5—四端子插座; 6—专用 CPU; 7—SRS ECU 插座

3.3.2.1 专用中央处理器 CPU

专用中央处理器 CPU 由模/数 (A/D) 转换器、数/模 (D/A) 转换器、串行输入/输出 (I/O) 接口、只读存储器 ROM、随机存储器 RAM、电可擦除可编程只读存储器 EEPROM 和定时器等组成, 其主要功用是监测汽车纵向减速度是否达到设定阈值, 控制气囊点火器引爆电路。

3.3.2.2 信号处理电路

信号处理电路主要由放大器和滤波器组成, 其功用是对传感器检测的信号进行整形和滤波处理, 以便 SRS ECU 能够接收与识别。

3.3.2.3 备用电源电路

SRS 有两个电源: 汽车电源 (蓄电池和交流发电机) 和备用电源。备用电源又称为后备电源或紧急备用电源, 由电源控制电路和若干个电容器组成, 其功用是: 当汽车电源与 SRS ECU 之间的电路切断后, 在一定时间 (一般为 6s) 内维持 SRS 供电, 保持 SRS 的正常功能。当汽车遭受碰撞而导致蓄电池或交流发电机与 SRS ECU 之间的电路切断时, 备用电源能在 6s 之内向电脑供给电能, 保证 SRS ECU 测出碰撞、发出点火指令等正常功能; 点火备用电源能在 6s 之内向点火器供给足够的点火能量引爆点火剂。时间超过 6s 之后, 备用电源供电能力降低, SRS ECU 备用电源不能保证电脑测出碰撞和发出点火指令; 点火备用电源不能供给最小点火能量, 气囊将不能充气膨开。

3.3.2.4 稳压保护电路

在汽车电器系统中, 许多电器部件带有电感线圈, 电器开关琳琅满目, 电器负载变化频繁。当线圈电流接通或切断、开关接通或断开、负载电流突然变化时, 都会产生瞬时脉冲电压即过电压, 这些过电压如果加到 SRS 电路上, 系统中的电子元件就可能因电压过高而导致损坏。为了防止 SRS 元件遭受损害, SRS ECU 中必须设置保护电路。同时, 为了保证汽车电源电压变化时 SRS 能正常工作, 还必须设

置稳压电路。

3.3.3 气囊组件

气囊组件按功用分为正面气囊组件和侧面气囊组件两大类。按安装位置分为驾驶席、前排乘客席 (副驾驶席)、后排乘客席气囊组件和侧面气囊组件四种。

气囊组件都是由气囊、点火器和气体发生器等组成。驾驶席与所有乘客席气囊组件一般都用同一个 SRS ECU 控制, 其组成部件和工作原理基本相同, 但结构尺寸有所不同。驾驶席气囊组件安装在转向盘中央, 前排乘客席气囊组件安装在副驾驶员座椅正前方的仪表台上。

驾驶席 SRS 气囊组件的结构如图 1.4-60 所示, 主要由气囊饰盖 2、气囊 3、气体发生器 4 和安装在气体发生器内部的点火器组成。

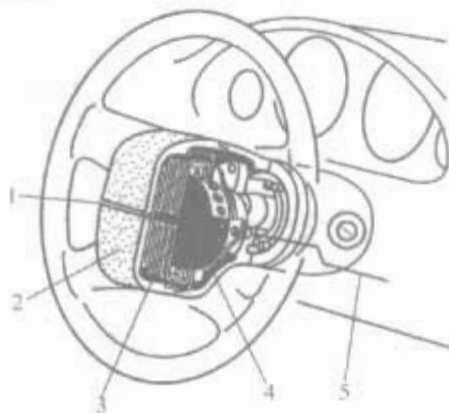


图 1.4-60 Bosch 公司驾驶席气囊组件的结构
1—饰盖撕印; 2—气囊饰盖; 3—气囊;
4—气体发生器; 5—点火器引线

3.3.3.1 气囊

气囊用聚酰胺织物 (如尼龙) 制成, 内层涂有聚氯丁二烯, 用以密闭气体。气囊在静止状态时, 像降落伞未打开时一样折叠成包, 安放在气体发生器上部与气囊饰盖之间。气囊开口一侧固定在气囊安装支架上, 先用金属垫圈与气囊支架座圈夹紧, 然后用铆钉铆接。气囊饰盖表面模压有撕印, 以便气囊充气时撕裂饰盖, 减小冲出饰盖的阻力。

3.3.3.2 气体发生器

气体发生器又称为充气器, 用专用螺栓与螺母固定在转向盘上的气囊支架上, 结构如图 1.4-61 所示, 由上盖 1、下盖 3、充气剂 4 和金属滤网 6 组成, 其功用是在点火器引爆点火剂时, 产生气体向气囊充气, 使气囊膨开。

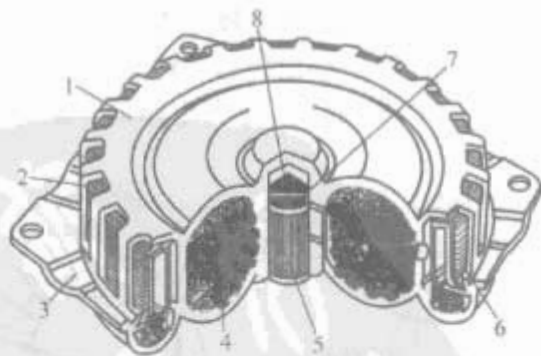


图 1.4-61 气囊气体发生器的结构
1—上盖; 2—充气孔; 3—下盖; 4—充
气剂; 5—点火器药筒; 6—金属滤网;
7—电热丝; 8—引爆炸药

气体发生器壳体由上盖和下盖两部分组成。上盖上制有若干个长方形或圆形充气孔。下盖上制有安装孔, 以便将气体发生器安装到转向盘上的气囊支架上。上盖与下盖用冷压工艺压装成一体, 壳体内装充气剂、滤网和点火器。金属滤网安放在气体发生器壳体的内表面, 用以过滤充气剂和点火

剂燃烧产生的渣粒。

充气剂普遍采用叠氮化钠（Sodium Azide）片状合剂。叠氮化钠的分子式为 NaN_3 ，是无色六方形晶体，有剧毒，密度为 1.846 g/cm^3 ，温度在约 300°C 时分解。可由氨基钠与一氧化二氮作用制得。叠氮化钠与铅盐（如硝酸铅）作用可制备起爆药叠氮化铅 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 。大多数气体发生器都是利用热效反应产生氮气而充入气囊。在点火器引爆点火剂瞬间，点火剂会产生大量热量，叠氮化钠药片受热立即分解释放氮气，并从充气孔充入气囊。虽然氮气是无毒气体。但是叠氮化钠的副产品有少量的氢氧化钠和碳酸氢钠（白色粉末）。这些物质是有害的，因此在清洁气囊膨开后的车内空间时，应保证通风良好并采取防护措施。

3.3.3.3 点火器

气囊点火器外包铝箔，安装在气体发生器内部中央位置，结构如图 1.4-63 所示。

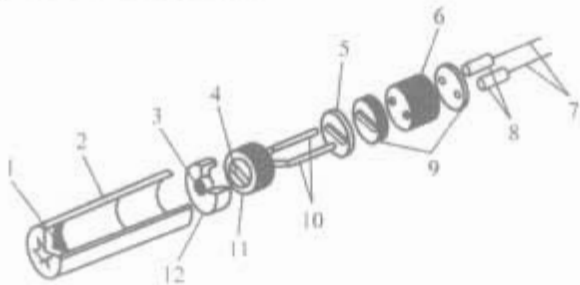


图 1.4-62 点火器零部件组成

1、3—引药；2—药筒；4—电热丝；5—陶瓷片；6—永久磁铁；7、10—电极引线；8—绝缘套管；9—绝缘垫片；11—电热头；12—药托

点火器的所有部件均装在药筒内。点火剂包括引爆炸药和引药。引出导线与气囊连接器插头连接，连接器（一般为黄色）中设有短路片（铜质弹簧片）。当连接器插头拔下或插头与插座未完全结合时，短路片将两根引线短接，防止静电或误通电将电热丝电路接通使点火剂引爆而造成气囊误膨开。

点火器的功用是：当 SRS ECU 发出点火指令使电热丝电路接通时，电热丝迅速红热引爆引药，炸药瞬间爆炸产生热量，药筒内温度和压力急剧升高并冲破药筒，使充气剂（叠氮化钠）受热分解释放氮气充入气囊。

乘客席气囊组件的结构特点：①体积比驾驶席气囊的体积大（因为气囊距离乘客的距离比距离驾驶员的距离长）；②气体发生器为长筒形。

3.3.4 SRS 指示灯

SRS 指示灯又称为 SRS 警告灯，安装在驾驶室仪表盘面膜下面，并在面膜表面相应位置制作有气囊动作图形或 SRS、AIR BAG、SRS AIR BAG 等字母表示。

SRS 指示灯的功用是：指示安全气囊系统功能是否正常。当点火开关拨到 ON 或 ACC 位置后，如果指示灯发亮或闪亮约 6s 后自动熄灭，表示 SRS 功能正常。如果指示灯不亮、一直发亮或在汽车行驶途中突然发亮或闪亮，说明自诊断测试系统发现 SRS 故障，应及时排除。自诊断系统在控制 SRS 指示灯发亮或闪亮的同时，还会将所发现的故障编成代码存储在存储器中。

3.4 安全气囊系统的保险装置

安全气囊系统工作可靠与否，直接关系到人身安全。为了便于检查排除故障，设计制造的安全气囊系统线束和连接器与其他电器系统都有区别。早期曾采用深蓝色，现大多数都采用黄色，欧洲汽车有的采用橘红色，奔驰汽车

采用红色。为了保证安全气囊系统 SRS 可靠工作，其线束连接器采用了导电性、耐久性良好的镀金接线端子，并设计有防止气囊误爆机构、电路连接诊断机构、端子双重锁定机构、连接器双重锁定机构。丰田花冠轿车 SRS 线束连接器示意图如图 1.4-63 所示，连接器采用的各种保险机构见表 1.4-7。

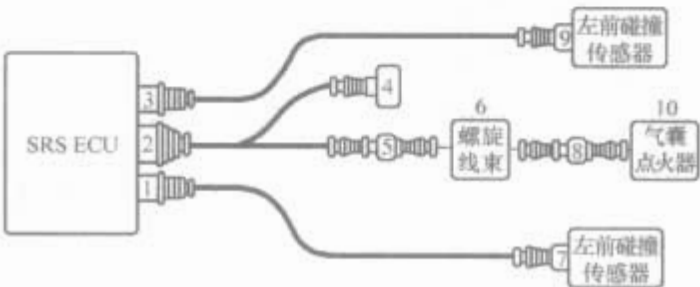


图 1.4-63 丰田花冠轿车 SRS 线束

连接器位置示意图

1、2、3—SRS ECU 连接器；4—SRS 电源连接器；
5—螺旋线束与 SRS ECU 之间的中间线束连接器；
6—螺旋线束；7—右碰撞传感器连接器；
8—SRS 气囊点火器与螺旋线束之间的连接器；
9—左碰撞传感器连接器；10—SRS 气囊点火器

表 1.4-7 丰田花冠轿车 SRS 保险机构的应用情况

序号	保险机构名称	采用该装置的连接器代号
1	防止气囊误爆机构	2、5、8
2	线路连接诊断机构	1、3、7、9
3	连接器双重锁定机构	5、8
4	端子双重锁定机构	1、2、3、4、5、7、8、9

3.4.1 防止气囊误爆机构

在图 1.4-63 所示的线束连接图中，从 SRS ECU 至气囊点火器之间的连接器 2、5、8 均采用了防止气囊误爆机构。

防止误爆机构为一块铜质弹簧片，称为短路片，其作用是：当连接器拔开（插头拔下或插头与插座未完全结合）时，短路片（弹簧片）自动将靠近气囊点火器一侧插座上的两个引线端子短接，（见图 1.4-64），防止静电或误通电将点火器电路接通而造成气囊误膨开。

短路片一般设在连接器插座上，当插头与插座正常连接时，插头的绝缘壳体将短路片向上顶起，如图 1.4-64（a）

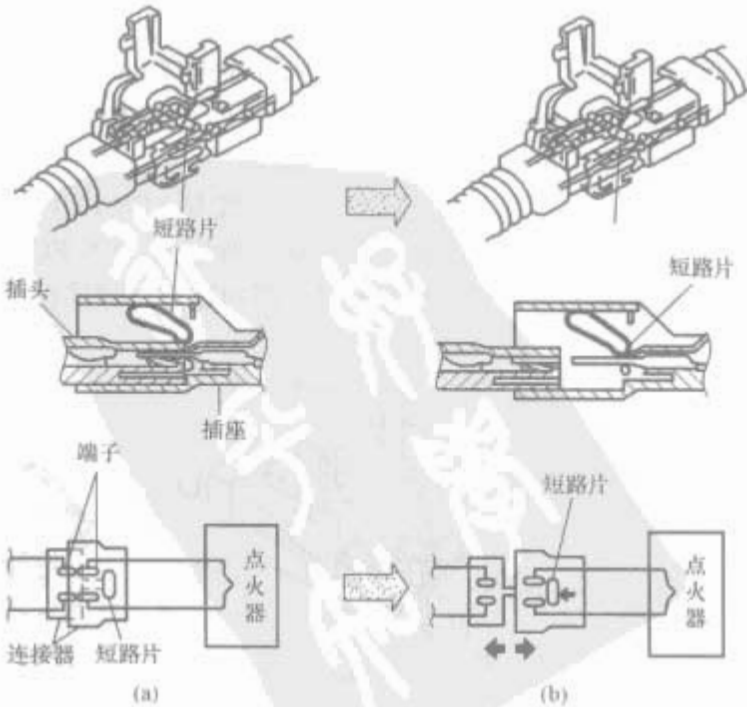


图 1.4-64 防止气囊误爆机构的结构原理

(a) 连接器正常连接时，短路片与端子脱开；
(b) 连接器拔开时，短路片将端子短接

所示,短路片与连接器端子脱开,插头引线端子与插座引线端子接触良好,点火器电热丝电路处于正常连接状态。

当插头与插座脱开时,短路片将气囊点火器一侧插座上的引线端子短接,使点火器电热丝与短路片构成回路,如图 1.4-64 (b) 所示,此时即使将电源加到点火器一侧连接器插座上,由于电源被短路片短路,因此点火器不会引爆气囊,从而达到防止气囊误爆之目的。

3.4.2 电路连接诊断机构

电路连接诊断机构的作用是监测连接器插头与插座是否可靠连接。前碰撞传感器连接器及其与 SRS ECU 连接的连接器 (见图 1.4-63 中连接器 1、3、7、9) 采用了电路连接诊断机构。

电路连接诊断机构的结构原理如图 1.4-65 所示。在连接器插头 (或插座) 上,设置有一个诊断销。在连接器插座上设置有两个诊断端子,端子上设有弹簧片,其中一个诊断端子与碰撞传感器的某一个触点相连,另一个诊断端子经过一个电阻 (丰田车系为 755~885Ω) 后与碰撞传感器的另一个触点相连。

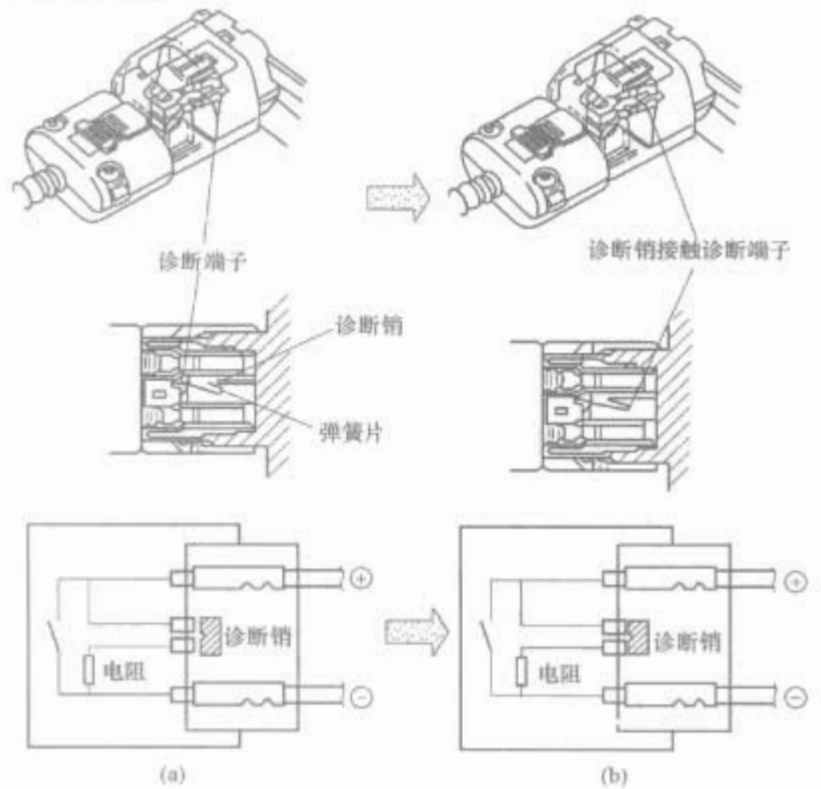


图 1.4-65 线束连接诊断机构的结构原理
(a) 半连接时; (b) 可靠连接时

当传感器插头与插座半连接 (未可靠连接) 时,诊断端子与诊断销尚未接触 [见图 1.4-65 (a)],此时电阻尚未与传感器触点构成并联电路,连接器引线“+”与“-”之间的电阻为无穷大。因为“+”、“-”引线 与 SRS ECU 连接器 1 或 3 (见图 1.4-63) 的插头连接,所以当 SRS ECU 监测到碰撞传感器的电阻为无穷大时,即判定连接器连接不可

靠,诊断监测电路就会控制 SRS 指示灯闪亮报警,同时将故障编成代码存储在存储器中。

当传感器插头与插座可靠连接时,诊断端子与诊断销可靠接触 [见图 1.4-65 (b)],此时电阻与碰撞传感器触点构成并联电路。因为碰撞传感器触点为动合触点,所以当 SRS ECU 检测到阻值为并联电阻阻值时,即判定连接器可靠连接,传感器电路连接正常。

3.4.3 连接器双重锁定机构

在安全气囊系统和座椅安全带控制系统中,线束重要连接部位的连接器 (见图 1.4-63 中连接器 5、8) 采用了双重锁定机构。连接器双重锁定机构的作用是锁定连接器插头与插座,防止连接器脱开。连接器双重锁定机构的结构原理如图 1.4-66 所示。

在连接器插头上,设有主锁和两个凸台。在连接器插座上,设有锁柄能够转动的副锁。

连接器双重锁定机构的工作原理是当主锁未锁定时,插头上的两个凸台就会阻止副锁锁定,如图 1.4-66 (a) 所示;当主锁完全锁定时,副锁锁柄方能转动并锁定,如图 1.4-66 (b) 所示;当主锁与副锁双重锁定后,连接器插头与插座的连接状态如图 1.4-66 (c) 所示,插头与插座可靠连接,从而防止连接器脱开。

3.4.4 接线端子双重锁定机构

在安全气囊系统的每一个连接器中,接线端子都设置有双重锁定机构,其作用是防止接线端子产生滑动。

接线端子双重锁定机构由连接器壳体上的锁柄与分隔片组成,如图 1.4-67 所示。其中,锁柄为一次锁定机构,防止端子沿导线轴线方向滑动;分隔片为二次锁定机构,防止端子沿导线径向移动。

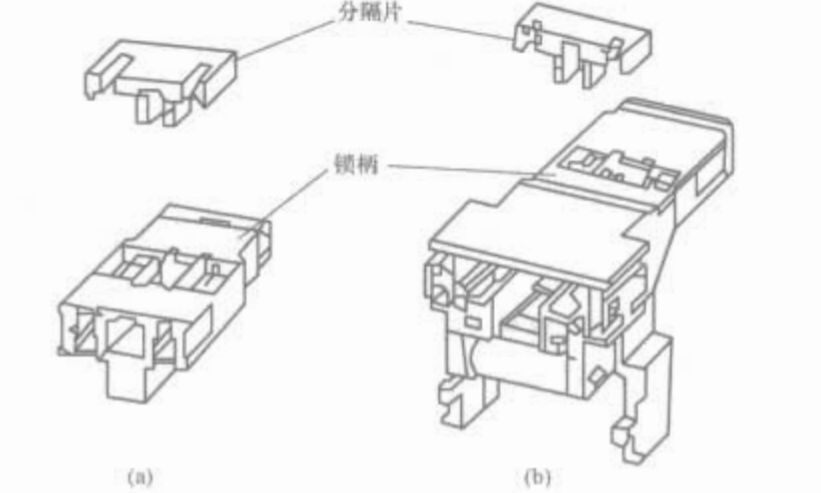


图 1.4-67 端子双重锁定机构
(a) 插头; (b) 插座

3.4.5 螺旋线束

安全气囊系统的所有线束都套装在黄色波纹管内,并与车颈线束总成连成一体,以便于区别。为了保证转向盘

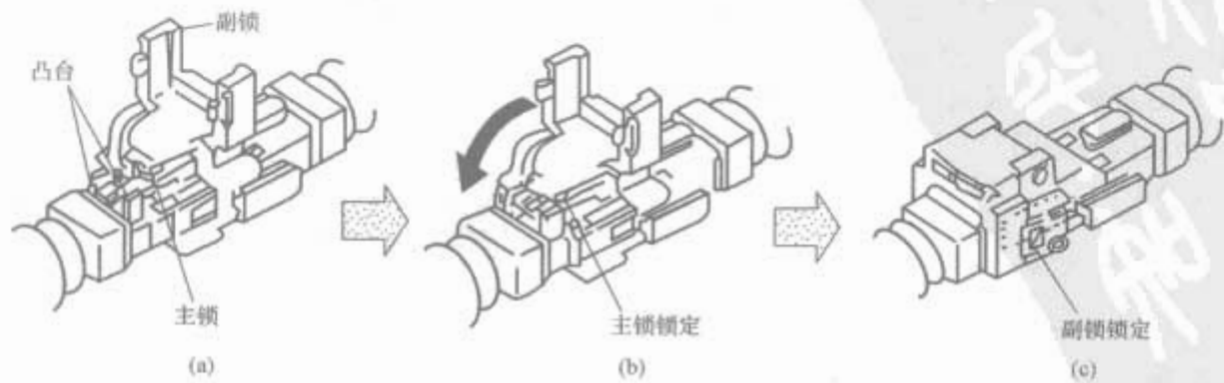


图 1.4-66 连接器双重锁定机构
(a) 主锁打开,副锁被挡住; (b) 主锁锁定,副锁可以合上; (c) 双重锁定

具有足够地转动角度而又不致损伤驾驶席气囊组件的连接线束，在转向盘与转向柱管之间采用了螺旋线束，即将线束安装在螺旋形弹簧内，再放到弹簧壳体内，如图 1.4-68 所示。

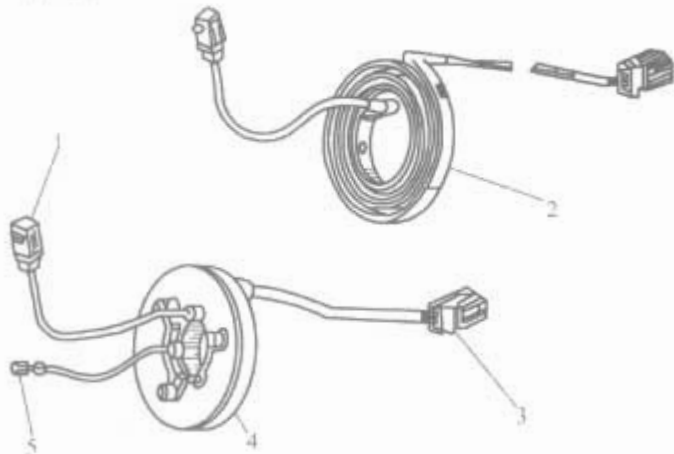


图 1.4-68 螺旋形弹簧与螺旋线束的结构
1, 3—线束插头或插座；2—螺旋形弹簧；
4—弹簧壳体；5—搭铁插头

在选装安全气囊的汽车上，电喇叭线束也安装在螺旋形弹簧内。螺旋弹簧安装在转向盘与转向柱管之间，安装时应注意其安装位置和方向，否则将会导致转向盘转动角度不足或转向沉重。

在不同型号汽车的电路图中，螺旋线束的名称各不相同，有的称为螺旋弹簧、时钟弹簧、游丝弹簧或游丝等。

3.5 座椅安全带控制系统

安全气囊系统是座椅安全带的辅助控制装置，为了充分发挥安全带的保护作用，确保汽车驾驶员和乘员的安全，国产中高档轿车已经装备座椅安全带控制系统。

座椅安全带控制系统的功用：在汽车遭受碰撞时，迅速收紧安全带，缩短驾驶员和乘客身体向前移动的距离，防止身体受到伤害。

3.5.1 安全带控制系统的结构特点

座椅安全带控制系统是在安全气囊系统的基础上，增设防护传感器和左、右座椅安全带收紧器组成。其中，前碰撞传感器、SRS ECU 与安全气囊系统公用。安全带收紧器为座椅安全带控制系统的执行机构，防护传感器设在 SRS ECU 内部，用于接通安全带收紧器的电源电路。图 1.4-69 所示为丰田凌志 LS400 型轿车安全气囊与安全带控制系统控制部件的安装位置示意图。

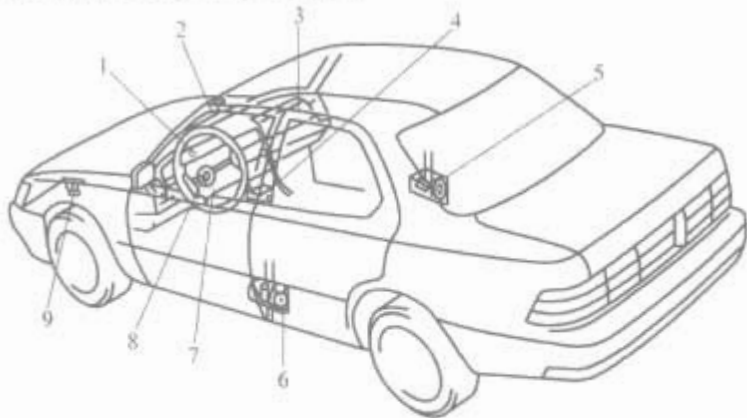


图 1.4-69 凌志 LS400 型轿车辅助防护系统零部件位置
1—SRS 指示灯；2—右前碰撞传感器；3—乘客席 SRS 气囊组件；
4—SRS ECU；5—右座椅安全带收紧器；6—左座椅安全带收紧器；
7—驾驶席 SRS 气囊组件；8—螺旋线束；9—左前碰撞传感器

安全带收紧器又称为安全带紧急张紧收缩器，安装在

排座椅左、右两侧或前左、右车门立柱旁边。安全带收紧器由导管（又称为气缸）、活塞、钢丝绳、气体发生器和安全带收缩棘轮组成，结构如图 1.4-70 所示。

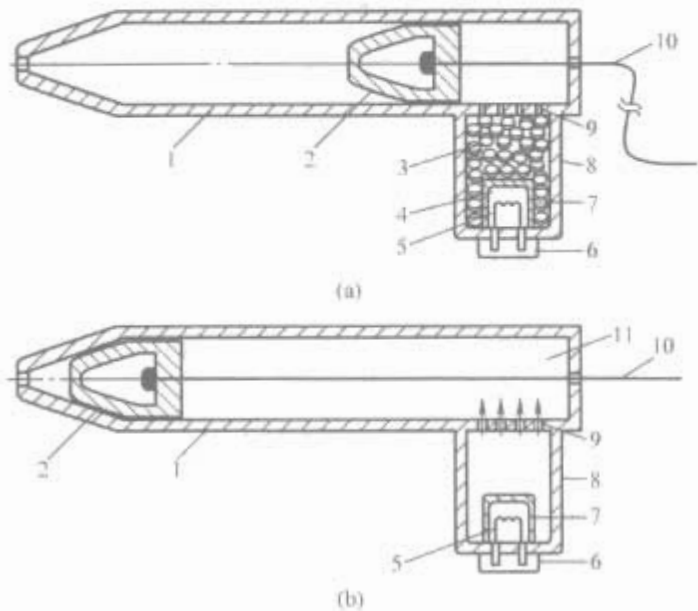


图 1.4-70 安全带收紧器结构原理
1—导管（气缸）；2—活塞；3—充气剂（叠氮化钠药片）；4—引爆炸药；5—电热丝；6—线束插座；
7, 9—通气孔；8—气体发生器；10—钢丝绳；11—气体

气体发生器的结构原理与安全气囊系统的气体发生器基本相同，也是由充气剂和点火器组成，有所不同的是体积很小，因此充气剂的用量很少。

活塞直径约 20mm，安装在导管（气缸）内。活塞上焊接有一根钢丝绳，钢丝绳的另一端固定在棘轮机构的一个棘爪上。

棘轮机构设在安全带伸缩卷筒的一端，由三个棘爪、一个外齿圈和时钟弹簧组成。外齿圈固定在安全带伸缩卷筒的转轴上，可与转轴一同转动，棘爪安放在外齿圈周围的圆形固定架内。当钢丝绳不动时，棘爪在时钟弹簧作用下处于松弛状态，外齿圈可随安全带卷筒沿顺时针或逆时针方向转动；当拉动钢丝绳时，拉力力矩克服时钟弹簧弹力力矩使棘爪抱紧在外齿圈上，并带动安全带伸缩卷筒转动，从而便可使安全带收紧。

3.5.2 安全带控制系统的控制过程

当汽车遭受碰撞且减速度达到前碰撞传感器和防护传感器设定阈值时，安全带控制系统的防护传感器将安全带点火器的电源电路接通，前碰撞传感器信号输入 SRS ECU 后，SRS ECU 将立即发出控制指令接通安全带收紧点火器的电路，电热丝通电电热并引爆引药，引药释放大量热量使充气剂受热分解并释放出大量无毒氮气充入收紧器导管。活塞在膨胀气体的推力作用下带动钢丝绳迅速移动。与此同时，钢



图 1.4-71 安全带与气囊控制系统的动作情况

丝绳通过棘轮机构带动安全带卷筒转动将安全带收紧，并在碰撞后 8ms 内将安全带收紧 10~15cm，使驾驶员和乘客身体向前移动距离缩短，防止面部、胸部与转向盘、挡风玻璃或仪表台发生碰撞而受到伤害。

在 SRS ECU 向安全带收紧器点火器发出点火指令的同

时，还要向气囊点火器发出点火指令，引爆气囊点火器。因为气囊要在碰撞约 40ms 才能完全充气到体积最大，所以在座椅安全带收紧后，驾驶席气囊和乘客席气囊才同时膨开（见图 1.4-71），吸收碰撞产生的动能，从而达到保护驾驶员和乘客的目的。



第5章 汽车辅助电气系统

本章主要介绍汽车车身电子中的汽车灯具与照明系统、汽车仪表及报警指示装置、汽车空调系统、汽车音响以及其他一些辅助电气系统的结构、原理及其控制技术。

1 汽车灯具与照明系统

1.1 分类和命名

汽车照明装置和光信号装置总称为汽车灯具，其作用是保证汽车的正常运行和在夜间或雾中的行车安全。中高档轿车一般都装备有 20 只左右的外部照明灯和 40 只左右的内部照明灯。汽车上的照明和信号装置是按其功能、用途和安装位置进行分类的，并规定了各种类型装置的型号命名方法。

1.1.1 名词术语

- (1) 单灯。由一个配光镜、一个或多个光源和一个灯体组成的单一功能的灯；此外，当总的透光面要符合某些特定条件时，也可是两只或两只以上具有同一功能和发出同一光色灯的组合体。
- (2) 独立灯。具有单独的透光面、单独的光源和灯体的灯。
- (3) 组合灯。具有分开的透光面、分开的光源和共同灯体的装置。
- (4) 复合灯。具有分开的透光面、共同的光源和灯体的装置。
- (5) 混合灯。具有分开的光源（或在各种条件下工作的单一光源）、共同的透光面和灯体的装置。

1.1.2 分类

汽车照明装置按其功能、用途和安装位置的分类见表 1.5-1。

表 1.5-1 汽车照明装置分类			
种 类	类 别	名 称	说 明
单灯或独立灯	外部照明装置	近光灯、远光灯、雾灯、牌照灯、倒车灯、防空灯	—
	外部信号装置	位置灯、停车灯、转向信号灯、制动灯、警告灯、后雾灯、标识灯、示廓灯、反射器、三角形后反射器	—
	内部照明装置	壁灯、顶灯、阅读灯、踏步灯、工作灯、发动机舱灯、行李箱灯	—
	内部信号装置		
组合灯、复合灯、混合灯	外部照明装置	组合前照灯、四灯制前照灯、混合前照灯、远近光灯	在这些装置中，只要包括有近光灯、远光灯、远近光灯、雾灯中任一种的，就属于外部照明装置，否则，属于外部信号装置
	外部信号装置	组合前信号灯、组合后信号灯、复合后信号灯	

1.1.3 型号命名

1.1.3.1 单灯的型号命名

单灯的型号命名一般由四部分组成，如图 1.5-1 所示。

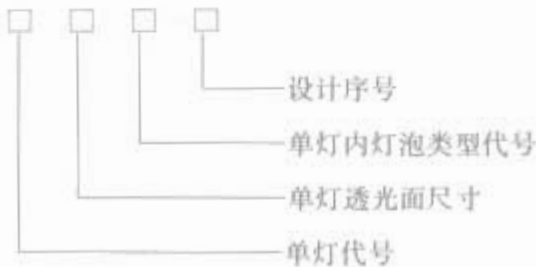


图 1.5-1 单灯的型号命名

代号按其名称顺序适当选取其中一个或一个以上单字的汉语拼音的第一个字母命名，见表 1.5-2。

1.1.3.2 组合灯、复合灯、混合灯的型号命名

组合灯、复合灯、混合灯的型号命名一般由四部分组成，如图 1.5-2 所示。



图 1.5-2 组合灯、复合灯、混合灯的型号命名

组合灯、复合灯、混合灯代号，除四灯制前照灯和远近光灯外，按其名称选取“组、复、混”字的汉语拼音第一个字母命名，即“Z、F、H”。

前后照明和信号装置代号，除四灯制前照灯和远近光灯外，按其名称选取“前、后”和“照、信”字的汉语拼音第一个字母并合而成，即由“Q、H”和“Z、X”并合而成。

四灯制前照灯由“四灯”的汉语拼音第一个字母组成，即由“S”和“D”并合而成。

远近光灯由“远、近”的汉语拼音第一个字母组成，即由“Y”和“J”并合而成。

组合灯、复合灯、混合灯的型号组成见表 1.5-3。

1.1.3.3 灯泡类型代号

装置内灯泡类型代号按表 1.5-4 的规定。除四灯制前照灯和远近光灯外，组合灯、复合灯、混合灯内灯泡代号不加标注。

1.1.3.4 设计序号

设计序号，按产品设计先后次序，以数字表示。

1.2 常见国内外汽车用灯具型号、性能特征及主要技术参数

1.2.1 主要技术参数

常见国内外汽车用内装式前照灯见表 1.5-5。常见汽车用雾灯性能特征及主要参数，见表 1.5-6。常见汽车用牌照灯性能特征及主要参数，见表 1.5-7。

表 1.5-2			单 灯 代 号			
外部照明装置			外部信号装置			
名 称	代 号	说 明	名 称	代 号	说 明	
顶灯	D	车厢内和驾驶室内两种	具有一个照明级制动灯	ZD1	前、后位置灯具有示意功能，侧位置灯、侧反射器具有示长功能	
阅读灯	YD		具有两个照明级制动灯	ZD2		
踏步灯	TB		停车灯	TC		
工作灯	GZ		警告灯	JG		
发动机舱灯	JC		后雾灯	HW		
行李箱灯	XL		标识灯	BS		
近光灯	J		示意灯	SK		
远光灯	Y		反射器	FS1		
雾灯	W		三角形后反射器	FS2	只用于挂车	
牌照灯	P		兼有信号功能	前位置灯	WZ1①	配光性能和几何可见度
倒车灯	DC	后位置灯		WZ2	角要求不同	
防空灯	FK	侧位置灯		WZ3		
				第1类转向信号灯	ZX1	
				第2a类转向信号灯	ZX2a	
				第2b类转向信号灯	ZX2b	
内部照明装置				第3类转向信号灯	ZX3	
门灯	M			第4类转向信号灯	ZX4	
壁灯	B			第5类转向信号灯	ZX5	

注 1. 组合前照灯由近光灯、远光灯或远近光灯、位置灯、转向信号灯等组合在一起，不包括四灯制前照灯。
2. 远近光灯属混合前照灯，该灯是混合前照灯的特例。
① 注脚1可以省略，省略后代码和原代码意义相同，如WZ1可以写成WZ代表前置灯，FS1可以写成FS代表反射器。

外部照明装置		外部信号装置		外部照明装置		外部信号装置	
组合前照灯	Z-QZ	组合前信号灯	Z-QX	混合前照灯	H-QZ	复合后信号灯	F-HX
四灯制前照灯	SD	组合后信号灯	Z-HX	远近光灯	YJ		

表 1.5-4 灯 泡 类 型 代 号					
灯泡类型	白炽灯泡	卤钨灯泡	封闭式灯泡 (灯光组)	封闭式卤钨灯泡 (灯光组)	荧光灯泡 (管)
代 号	不加标注	L	F	FL	Y

表 1.5-5 常见国内外汽车用内装式前照灯型号、性能特征及主要技术参数										
车 型	灯光组结构	灯具型号	透光尺寸 (mm)	发光强度 (cd)	散射角度		灯泡参数			备 注
					水平	垂直	型号	电压 (V)	功率 (W)	
EQ1090E SH142 BJ2020	半封闭式 或封闭式	ND170—3C	φ170	≥25000	≥18	≥6	QT12—45/40P QT24—55/40P 真空灯芯	12 24 12/24	45/40 55/40 60/50	
柳州 LZ1010	半封闭式		φ170	≥25000	≥18	≥6	QT12—45/40	12	45/40	
BJ1040	半封闭式 或封闭式		φ134	≥20000	≥18	≥6	QT12—45/40P QT12—50/ 35PY 真空灯芯	12 24 12/24	45/40 50/35 60/50	黄色泡 作雾灯
沈阳 SY1040	半封闭式 或封闭式		φ134	≥25000	≥18	≥6	QT12—45/40P	12	45/40	
SH361	半封闭式		φ136					12 12 24 24	45/40 45 55 55/50	双光 单近光 单远光 双光

续表										
车 型	灯光组结构	灯具型号	透光尺寸 (mm)	发光强度 (cd)	散射角度		灯泡参数			备 注
					水平	垂直	型号	电压 (V)	功率 (W)	
三菱 FP418	半封闭式 或封闭式		φ136				QT12—45/40P QT12—45	12 12	45/40 45	双光 单远光
五十铃	半封闭式	SD100Z165	100×165				QT12—45/40P QT12—45	12 12	45/40 45	双光 单远光
SH7221 SH760b	半封闭式	ND140×220	140×220				QT12—45/40P QT12—60/55P2	12 12	45/40 60/55	
BJ1041	封闭式		100×165				T100×165FP T100×165F	12 12	55/50 55	双光 单远光
	半封闭式						QT12—45/40P QT12—45	12 12	45/40 45	双光 单远光
上海桑塔 纳	半封闭式 组合前置灯	ND145× 230—R ND145× 230—L	145×230				LQ12—60/55P1 QT12—4 QT12—55	12 12 12	60/55 4 55	前照灯 前位灯 雾灯
济南罗曼 JN162		ND132×290	132×290				QT24—55/50	24	55/50	
BJ213		ND132×190	132×190				QT12—45/40	12	45/40	
CA10	半封闭式 或封闭式	WD170	φ170	≥25000			QT12—45/40P 真空灯芯	12 12/24	45/40 60/50	
NJ130	半封闭式	WD136	φ136	≥20000	≥18	≥6	QT6—45/40P QT12—45/40P QT24—55/50P QF144P—2 QF144P—3	6 12 24 12 24	45/40 45/40 55/50 55/50 55/50	

表 1.5-6 常见汽车用雾灯性能特征及主要参数

车 型	灯光组结构	安装方式	透光尺寸 (mm)	灯 泡 参 数			
				型 号	电压 (V)	功率 (W)	备 注
SH7221	半封闭式	内装式	135×60		12 24	50/35 50/35	黄泡壳 黄泡壳
BJ1041	半封闭式	内装式	176×81	QT12—21	12	21	
EQ1090E	半封闭式		115×105	QT12—45	12	45	配光镜为明 黄色
EQ133	半封闭式或封闭式	外装式	φ134	QT12—35 QT24—35	12	45/40	配光镜为明 黄色
济南罗曼 JN162	半封闭式	外装式	φ136	QT24—21	24	21	
各类载货汽车、 客车用	半封闭式 圆形灯	外装式		QT6—35 QT12—35 QT24—35		35 35 35	

表 1.5-7 常见汽车用牌照灯主要参数

车 型	灯 泡 参 数				备 注
	型 号	电压 (V)	功率 (W)	只 数	
公共汽车 大客车	QT12—10 或 QT24—10	12 24	10 10	—	—
SH760A, BJ1040	QT12—5S 或 QT24—5S	12 24	5 5	2 2	白色
上海桑塔纳	QT12—4	12	4	—	—

1.2.2 常用国产及进口汽车的灯光配置

常用国产及进口汽车的灯光配置见表 1.5-8。

表 1.5-8 常用国产及进口汽车灯光配置及技术参数

车 型	前照灯		制动灯、 示宽灯	转向灯、 示宽灯	倒车灯	仪表灯	室内灯
	双丝灯	单丝灯					
CA141	12VH ₄	12VH ₃	21/5W	21/5W	21W	2W	5W
EQ140-1	45/40W	28W	20W	20W	28W	2W	5W
EQ140	50/35W	28W	20W	20W	28W	2W	5W
NJ130	50/21cd		21cd	21cd	—	1cd	6cd
CA10B	50/21cd		21cd	21cd	—	1cd	6cd
BJ212	50/21cd		21cd	21cd	—	1.5cd	
JN150		50W	15W	15W	—	1.5W	15W
五十铃 TXD	60/40W		25W	25W	25W	3W	10W
日野 KB222、 KB212	60/40W		25W	25W	25W	3W	10W
CA773	60/32cd		21cd	32cd	21cd	1.5cd	—
TJ7100	45/40W		21/5W	21W	21W	3.4W	10W
BJe	55/45W		26.9/ 6.1W	26.9W	26.9W	3.8W+ 2.7W	12.4W
奥迪 100	60/55W		21/5W	21W	21W	2.0W	10W

部分汽车照明灯的功率选配见表 1.5-9。

表 1.5-9 部分汽车照明灯功率的选配表 W

汽车 型号	电压 (V)	前照灯		示 宽 灯	转 向 灯	牌 照 灯	制 动 灯	仪 表 灯	顶 灯	其他灯具
		远光	近光							
奥迪 100	12	60	55	8	21	5	21	2	10	倒车灯 21， 前雾灯 55，前 停车灯 4
切诺基	12	55	45	3.8	6.1	4.9	26.9	2.7		尾灯 6.1， 警告灯 1.4
CA1091	12	外侧 60， 内侧 55	55	5	21	5	21	2	5	后照灯兼 倒车灯 21，临 时停车示宽 灯 3
EQ1090	12	50	35	20	20	8	20	2	5	前侧灯、后 照灯 28，工作 灯 20，发动机 舱照明灯 8
BJ2020	12	50(45)	40(20)	8	20	8	20	2	8	防空防雾 灯 35，工作灯 8，阅读灯 2
NJ130	12	50(45)	40(20)	8	20	8	20	2	8	工作灯 20
NJ150	24	50(55)	40(35)	8	20	8	20	2	8	防雾灯 35， 测示宽灯 8

注 前照灯参数中，无括号者为真空灯，括号内为白炽灯泡。

对于汽车，工作电压范围必须符合表 1.5-10 规定，牵引挂车的汽车还必须符合表 1.5-11 规定。

表 1.5-10 汽车工作电压范围 V

汽 车 灯	标称电压为 12		标称电压为 24	
	工作电压范围		工作电压范围	
	最小值	最大值	最小值	最大值
远光灯	12.2	14.1	25.4	29.0
近光灯	12.5	14	25.0	
前雾灯	12.2	14.1	25.4	
前位灯	12.1	14.5	25.2	
后位灯	12.1	14.5	25.2	
牌照灯	12.1	14.5	25.2	
前转向信号灯	12.1	14.5	25.2	
侧转向信号灯	12.1	14.5	25.2	
后转向信号灯	12.1	14.5	25.2	
制动灯	12.1	14.5	25.2	

表 1.5-11 牵引挂车的汽车工作电压范围 V

汽 车 灯	向挂车上、下列 汽车灯送电的 插座接线柱	标称电压为 12V		标称电压为 24V	
		工作电压范围		工作电压范围	
		最小值	最大值	最小值	最大值
远光灯		12.2	14.1	25.4	29.0
近光灯		12.5	14.1	26	
前雾灯		12.2	14.1	25.4	
前位灯		12.1	14.5	25.2	
前转向信号灯		12.1	14.5	25.2	
侧转向信号灯		12.1	14.5	25.2	
侧转向信号灯		12.4	14.5	25.4	
后转向信号灯		12.4	14.5	25.4	
制动灯		12.4	14.5	25.4	
后位灯		12.4	14.5	25.4	

对于挂车，工作电压范围必须符合表 1.5-12 规定。

表 1.5-12 挂车工作电压范围 V

挂车上汽车灯	标称电压为 12	标称电压为 24
	工作电压范围的 最小值	工作电压范围的 最小值
后 位 灯 牌 照 灯 侧转向信号灯 后转向信号灯 制 动 灯	12.0	25.8

1.3 照明装置的结构与原理

1.3.1 外部照明装置

1.3.1.1 前照灯

前照灯又称大灯，通常为白色，用单丝或双丝灯泡，远光灯丝功率一般为 40~60W，近光功率为 20~55W。前照灯的用途主要是夜间驶时照亮车前的道路及物体，同时还可以用远、近光的变换信号超越前方车辆等。前照灯安装于汽车头部两侧，一般为两灯制或四灯制。

(1) 前照灯的分类。前照灯的分类见表 1.5-13。

分类方式	类 别	型 号
安装在车辆上数量	二灯制	SD
	四灯制	
安装方式	内装式	ND
	外装式	WD
灯光组形式	半封闭式	F
	封闭式	
形状	圆形	
	矩形	
	特殊形状	
光束类型	远光	R
	近光	C
	远、近光	CR

(2) 前照灯的构造及安装。

1) 前照灯的构造。①半封闭式前照灯。如图 1.5-3 所示，配光镜是由反射镜周沿的牙齿经橡胶密封圈紧扣成一体，再装于灯壳内，灯泡可从反射镜的后方装拆而无需拆开光学组件。半封闭式前照灯维修方便，密封性较好，使用较

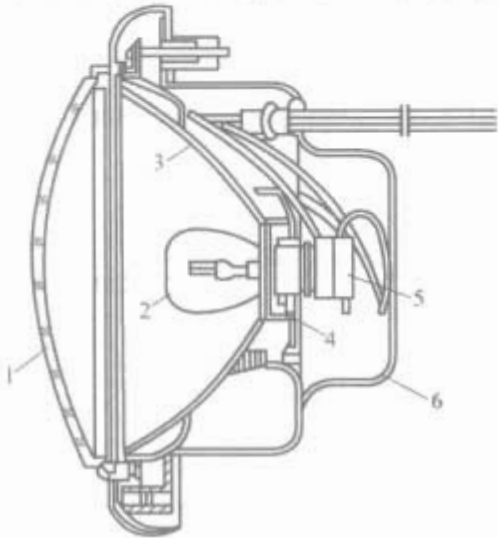


图 1.5-3 半封闭式前照灯
1—配光镜；2—灯泡；3—反射镜；
4—插座；5—接线器；6—灯壳

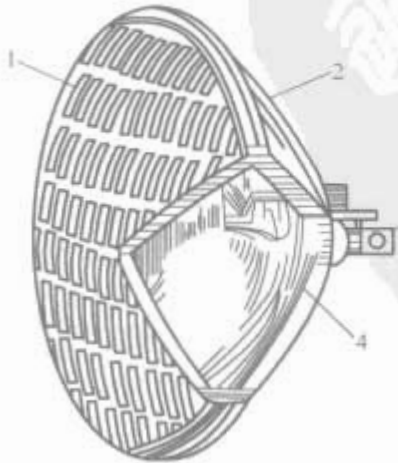


图 1.5-4 封闭式前照灯
1—配光镜；2—反射镜；
3—接头；4—灯丝

普遍。②封闭式前照灯。又称真空灯芯（真空灯），其特点是配光镜、反射镜融为一体，灯芯装于其中，实质上光学组件就是一只灯泡，如图 1.5-4 所示。③投射式前照灯。是现在最新型的车灯，采用较厚而没花纹的凸透镜的外观，也非常轻巧，其构造如图 1.5-5 所示。由于反光镜采用了椭圆体的形状，因此外径可以做得很小。因投射式的车灯其反光镜为椭圆球面形，故有 2 个焦点。通常在第一个交点处安装灯泡。第 2 焦点也在灯的内部，凸透镜的焦点就在第 2 焦点处。从灯泡发出的光经过反光镜被集中到第 2 焦点处，再通过凸透镜的集中向前方投射。投射式前照灯可以利用的光束很多，如将反射面做成横宽型，则光束可以更多地朝向横方向。它是一款既轻巧又不造成灯光浪费的车灯形式。投射式前照灯在第 2 焦点处设置了被称为遮光板的装置，可以有效地遮住上半部分的光，从而得到明暗分明的配光。这种灯的配光特性，非常适用于近光灯和雾灯采用。

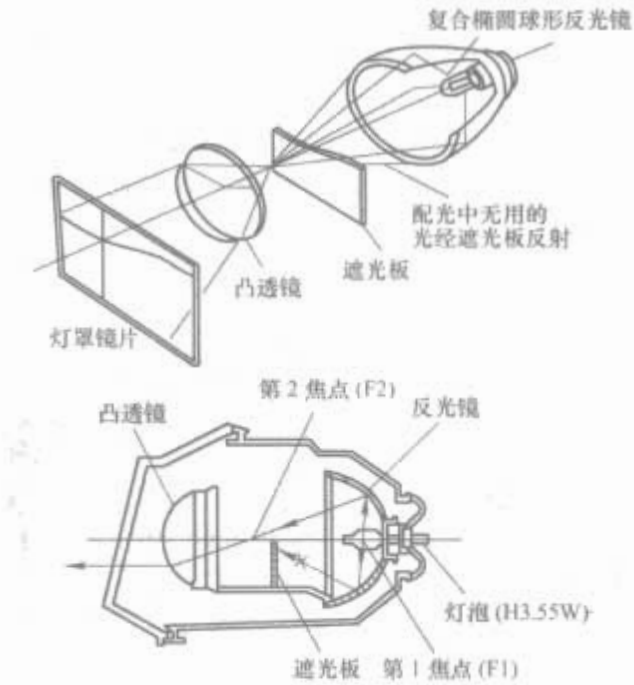


图 1.5-5 投射式前照灯的构造

2) 前照灯的安装形式。前照灯的安装形式可分为外装式、内装式和四灯组合制。一般均安装于车头两侧，利用灯壳上伸出的安装螺栓固定，如图 1.5-6 所示。

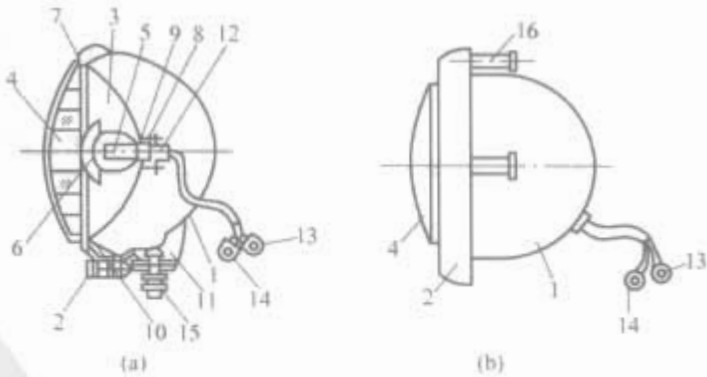


图 1.5-6 内装、外装式前照灯
(a) 外装式；(b) 内装式

1—灯壳；2—灯圈；3—反射镜；4—配光镜；5—灯泡；
6—遮光罩；7—密封盘；8—灯座；9—定焦盘；10—夹持器；11—支座；12—灯泡插卡总成；13—近光导线；14—远光导线；15—安装螺栓；16—调整螺栓

四灯制结构的前照灯由远光灯、近光灯和角灯组合在同一灯体内，将雾灯镶在保险杠内。四灯制前照明系统的外观如图 1.5-7 所示。

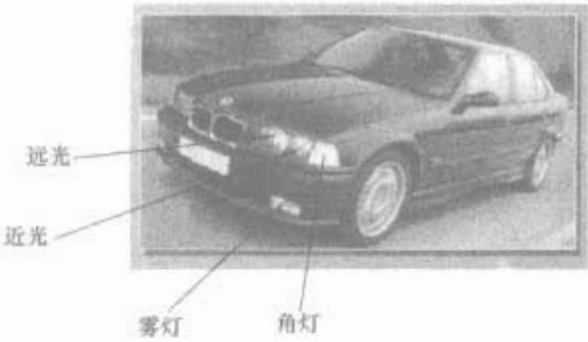


图 1.5-7 四灯制前照明系统

1.3.1.2 雾灯

雾灯的作用是在雾天、下雪、暴雨或尘埃弥漫的气候条件下，照清车前道路，并为前方来车提供本车信号。在雾、雪、雨或尘埃弥漫等有碍可见度的情况下，为使车辆后方其他道路使用者易于发现本车，在车辆尾部安装后雾灯。后雾灯光度比后位灯更强的红色信号灯。

(1) 参数及灯光配置。封闭式灯光组的电压和功率应参照半封闭式前雾灯使用的灯泡规定。半封闭式前雾灯使用的灯泡产品应符合表 1.5-14 的规定。

(2) 雾灯的结构。雾灯与仅有一根灯丝的前照灯结构相似，其外形尺寸、形状等无统一规定，有圆形和方形两种，如图 1.5-8 所示。

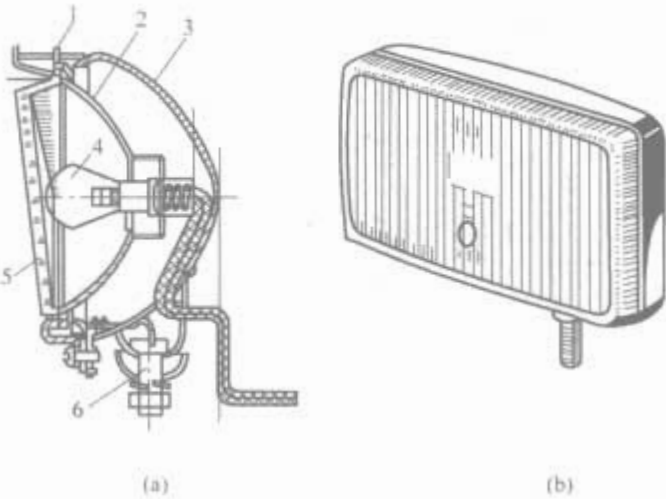


图 1.5-8 雾灯的结构和形式

(a) 圆形；(b) 方形
1—罩圈；2—反射镜；3—灯壳；4—灯泡；
5—配光镜；6—安装螺栓

雾灯灯光的透射颜色较多地采用波长较长的黄色或橙

色。着色方法一般有灯泡泡壳着色和配光镜着色，也有采用反射镜着色的。

1.3.1.3 牌照灯

牌照灯的结构如图 1.5-9 所示，配光镜 1 用无色透明塑料注塑成形，灯泡 3 一般采用 SV 型灯头的灯泡，功率为 5~10W。接触片 4 多采用磷铜片冲压而成，以提高其弹性接触性能。为满足汽车整体结构的需要，牌照灯的结构形式多样，有长方形、圆形等。

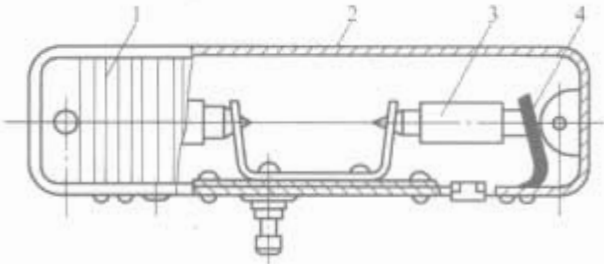


图 1.5-9 牌照灯结构

1—配光镜；2—外壳；3—灯泡；4—接触片

1.3.1.4 倒车灯

倒车灯和中性安全开关的工作原理如图 1.5-10 所示。控制两个倒车灯的开关由变速杆操纵。当变速杆位于倒挡位置时，倒车灯电路接通。在某些汽车上，倒车灯开关是与中性安全开关结合在一起的，因两者结合在一起比较经济。当变速杆换到倒车挡时，该开关向倒车灯提供 12V 电源，同时又防止发动机因变速而启动。该开关只允许发动机在变速杆处于中性或停车位置时才启动。当变速杆处在其他位置时，到起动机电磁阀的电路断开。

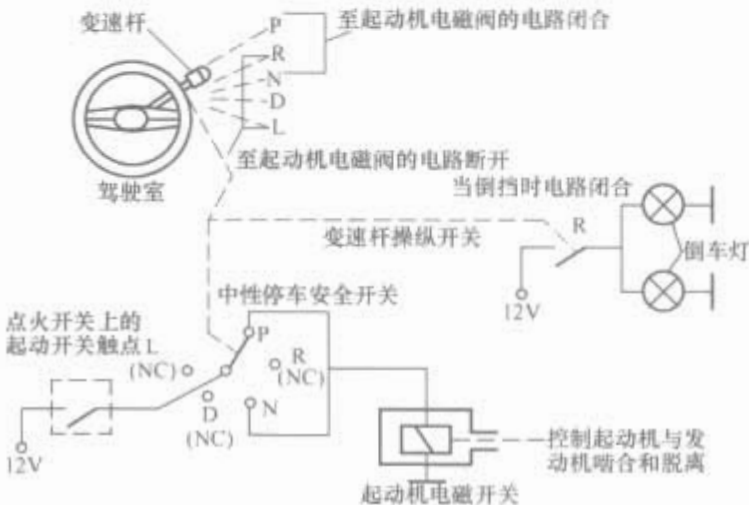


图 1.5-10 倒车灯与中性安全开关的工作原理示意图

表 1.5-14 半封闭式前雾灯使用的灯泡产品要求

类 型		白 炽 灯		卤 钨 灯							
灯泡型号		F1		H1		H2		H3		H4 (近光灯丝)	
标称电压 (V)		12	24	12	24	12	24	12	24	12	24
标称功率 (W)		35	55	70	55	70	55	70	55	70	
试验电压 (V)		13.2	28.0	13.2	28.0	13.2	28.0	13.2	28.0	13.2	28.0
在试验电压下	功率 (W)	35 ±10%		68 (最大值)	84 (最大值)	68 (最大值)	84 (最大值)	68 (最大值)	84 (最大值)	68 (最大值)	80 (最大值)
	光通量 (lm)	685 (1±20%)	650 (1±20%) (±25%)	1550 (1±15%)	1900 (1±15%)	1800 (1±15%)	2150 (1±15%)	1450 (1±15%) (±20%)	1750 (1±15%) (±20%)	1000 (1±15%) (±20%)	1200 (1±15%) (±20%)
灯头型号		BA20S		P14.5S		X511		PK22S		P43t-38	

注 括号内的数据仅限轿车以外的车辆使用。

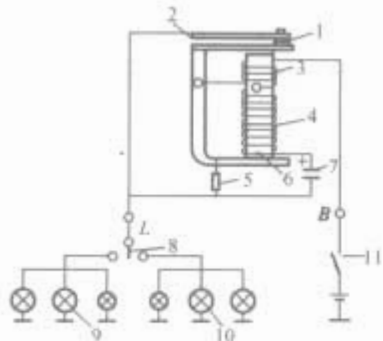
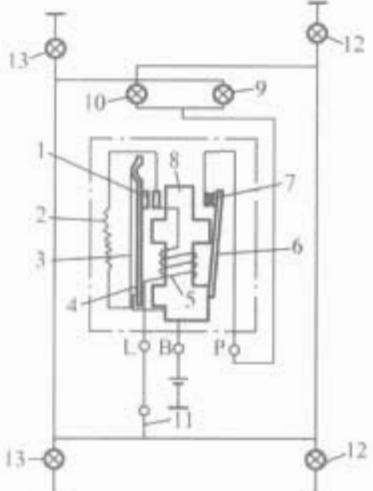
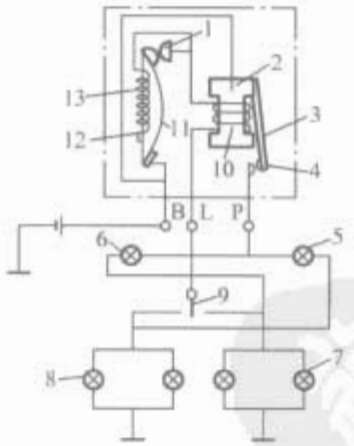
续表

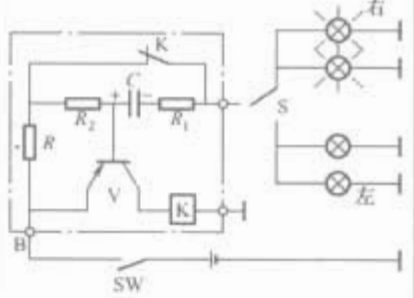
1.3.2 闪光器

闪光器为闪光继电器的简称，它串联在转向信号灯和转向指示灯与电源之间的电路中，一般安装在发动机罩下。其作用是使转向灯和指示灯发出明暗交替的醒目的闪烁信号，以指示车辆的行驶方向，便于交通指挥。

(1) 闪光器的结构和工作原理。闪光器的结构和工作原理见表 1.5-15。

表 1.5-15 闪光器的结构和工作原理

类型	特点	结 构	说 明
电 容 式 闪 光 器	电容器的充电和放电来控制转向信号灯的闪烁		1—触点；2—弹簧片；3—串联线圈；4—并联线圈；5—灭弧电阻；6—铁心；7—电解电容器；8—转向灯开关；9—左转向信号灯和指示灯；10—右转向信号等和指示灯；11—电源开关
电 热 丝 式 闪 光 器	结构简单；制造成本低，闪光频率不够稳定；使用寿命短，信号灯亮，暗不够明显		转向信号灯的闪光频率为 $1.5\text{Hz} \pm 0.5\text{Hz}$ (GB 7258—1997)。转向信号灯的闪光频率可以通过调节片改变镍铬丝的拉力及触点间隙来进行调整 1—主触点副；2—附加电阻；3—电热丝；4—主触点臂；5—线圈；6—副触点臂；7—副触点副；8—铁心；9—仪表板指示灯(右)；10—仪表板指示灯(左)；11—转向灯开关；12—右转向信号灯；13—左转向信号灯
欧 翼 片 式	结构简单、体积小，且工作时伴有响声		1—主触点副；2—铁心；3—副触点臂；4—副触点副；5、6—仪表板指示灯；7、8—转向信号灯；9—转向灯开关；10—线圈；11—弹簧片；12—热胀片；13—电阻丝

类型	特点	结 构	说 明
晶 体 闪 光 器	使用元件少，成本较低，结构简单，工作可靠		

(2) 闪光器的型号含义及常用国内外主要汽车采用的闪光器。

1) 国产汽车转向闪光器型号编制方法。根据中华人民共和国汽车行业标准 QC/T73—1993《汽车电气设备产品型号编制方法》规定，闪光器的型号组成如图 1.5-11 所示。

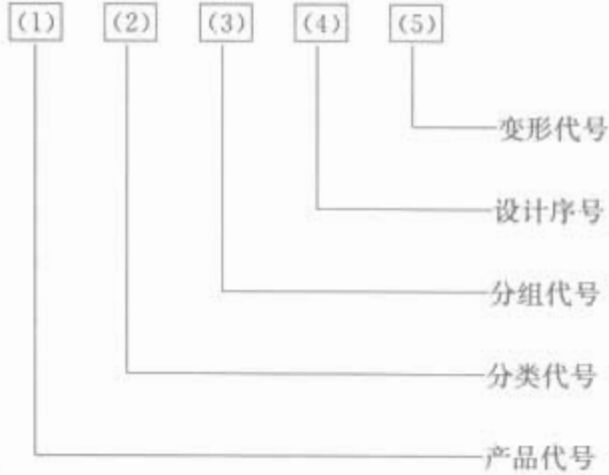


图 1.5-11 国产汽车转向闪光器型号编制方法

- 产品代号：SG——闪光器，SGD——电子闪光器。
- 分类代号：以电压等级为分类代号，1——12V，2——24V，6——6V。
- 分组代号：以结构型式为分组代号，1——电容，2——电热丝，3——叶片弹跳（翼片），4——无触点，5——有触点，6——无触点复合，7——有触点复合，8——带蜂鸣无触点复合，9——带蜂鸣有触点复合。
- 2) 国产闪光器主要技术数据，见表 1.5-16。
- 3) 常用车型配用闪光器见表 1.5-17。

表 1.5-16 国产闪光器主要技术数据

型 号	类 型	额定电压 (V)	负 载 功 率				闪光频率 (次/min)	备 注
			前	侧	后	指示		
SD56	电热丝	12	21cd		21cd	1cd	50~110	
SD56A	电热丝	6	21cd		21cd	1cd	50~110	
SD56B	电热丝	24	15W	15W	15W	1.5W	50~110	
SD57	电热丝	12	32cd		21cd	1cd	50~110	
SD57C	电热丝	24	15W		15W	1.5W	50~110	
SD57D	电热丝	12	20W	20W	20W	2W	50~110	
SG112	电容	12	21cd		21cd	1cd	50~110	
SG112B	电容	12	50W	50~110W				
SG112L	电容	12	43cd	50~110W				
SG112J	电容	12	86cd	50~110W				
SG212J	电容	24	46.5W	50~110W				
SG624	翼片	6	17.5W	60~120W				
SG624B	翼片	6	16W				60~120	
SG624C	翼片	6	17.5W				60~120	
SG124	翼片	12	42W				60~120	
SG224	翼片	24	47W				60~120	
SG224A	翼片	24	47W				60~120	
SG224L	翼片	24	88W				60~120	
SG145	翼片	12	42W				60~120	有蜂鸣器
JSG142	电子式	12	44 (88) W				60~120	报警时 88W
JSG241	电子式	24	44 (90) W				60~120	报警时 90W
JS212	电热丝	12	42W				60~120	
JS212A	电热丝	12	50W				50~110	
JS214	电热丝	24	46.5W				60~120	
FS101A	12						50~110	蜂鸣闪光器声音 60~120dB
SG151A	电子式	12	57.4W				60~120	三插头夹持式
SG151	电子式	12.8	57.4W				60~120	三插头夹持式
SG152	电子式	12	100W				60~120	三插头
SG252	电子式	28	100W				60~120	三插头
SG123A SG123B SG123C	翼片	12	32cd		32cd	1cd	50~110	起动时间≤1.5s, 通电率 30%~75%
SG225A SG225B	翼片	24	32cd		32cd	1cd	50~110	起动时间<1.5s, 通电率 30%~75%
SG212	电容	24	15W	15W	15W	1.5W	50~110	
JQ501A	电子式	12	54.4 (108.8) W				90±30	报警时 108.8W
JSD69	电子式	24	≤150W				60~120	
YS153 SG152B JSG154	电子式	12 12 12	1~100W 44 (88) W 42 (88) W				60~120 60~120 60~120	音乐闪光器 报警时 88W, 通电率 35%~60%
SG124L	翼片	12	21W	60~120W	21W	2W	60~120	
SG124C	翼片	12	20W		20W	2W	60~120	
SG212L	电容	24	L1 : 42W L2 : 42W				50~110	

表 1.5-17 常用车型配用闪光器

车 型	闪 光 器		电压 (V)	功率 (W)	生产厂商
	型 号	型 式			
CA141	SG124C	翼片	12	42	上海交通电器厂
CA141K ₂	SG224C	翼片	24	42	上海交通电器厂
CA141K ₃	SG224C	翼片	24	42	上海交通电器厂
CA120F		蜂鸣闪光器	12	42	上海交通电器厂
		电子闪光器		85	哈尔滨汽车电器厂
CA130		蜂鸣闪光器	12	42	
		电子闪光器		85	
Audio00		蜂鸣闪光器	12	42	
		电子闪光器		85	
EQ1090—1	SG152B	电子	12	44/88	
EQ1090—2		翼片	12	180	
NJD331A		翼片	24	43	广州汽车电器厂
NJ131A		翼片	12	43	
NJ136A ₂		翼片	12	43	
NJ221B		翼片	12	43	
IVECO30.8		电子式	12	47	
IVECO35.8		电子式	12	47	
IVECO40.8		电子式	12	47	
IVECO45.10		电子式	12	47	
IVECO49.10		电子式	12	47	
XQ1040		电子式	12	45	日本
BJ136		电子式	12	27×4+3×2	广州汽车电器厂
BJ122	SG123B	翼片	12	42	
SY134		电子式	12	60	
斯塔尔 1491		电子式	24	21×4/21×8	西德 Hello
CO30.290/B38		电子式	24	47	罗马尼亚
CO19.210/B46					
T815.VE26			24	21×5	捷克
华利 TJ110		电子式	12	108	
夏利 TJ7100		集成电路	12	108	
LZ110D	SG12—1	翼片	12	53	柳州仪器仪表厂
WJ110		电子式	12	88	哈尔滨汽车电器厂
CH110X		电子式	12	27×4	昌河汽车附件厂
BJ374		钨丝	24	72	上海交通电器厂
BJ3480		钨丝	24	72	上海交通电器厂
SH162	SD56B	钨丝	24	46.5	上海交通电器厂
SF3102	SD56B	钨丝	24	46.5	上海交通电器厂
SF3103	SD56B	钨丝	24	46.5	上海交通电器厂
SX162		钨丝			
SX162		钨丝	24	44	
BJ213		翼片	12	57.6/111.4	
SANTANA		电子式	12		西德 Hello
SH760B			12	21×4+2	上海交通电器厂
标致 504		电子式	12	92	进口
天津 TJ6481		电子式	12	27×2+1.4	上海交通电器厂
DD652	SG212	电容	24	50	
DD640	SG122L	电容	12	44	
DD683	SG212	电容	24	50/100	
DD684	SG212	电容	24	50/100	
CK420N		电子式或翼片	12	42	
				45	
CJ642B—G	SG122C	电容	12	84	上海交通电器厂
WH645	SD56B	钨丝	24	46.5	上海交通电器厂
SF665	SG212	电容	24	55×2	白城汽车电器厂
SF662	SG112	电容	12	55×2	白城汽车电器厂
XQ643		电容	12		
XQ642T	FM—82	蜂鸣闪光器	24		浙江
伏尔加 24—10	PC950N	电子式	12		进口
伏尔加 24	PC950	电子式	12		进口

1.3.3 内部照明装置

车内照明灯用于在夜间方便驾驶员和乘客上下车、提取与存放行李及看地图、文件等。常用的各种车内照明灯在车辆中的安装位置如图 1.5-12 所示。

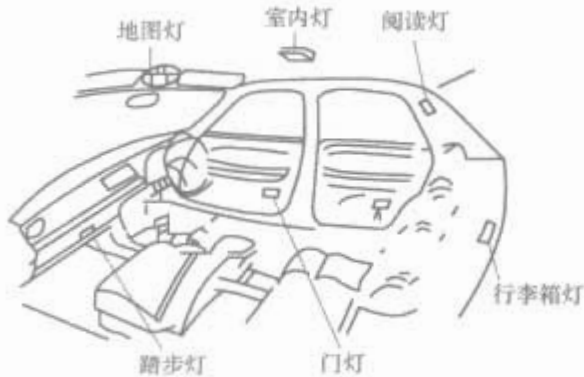


图 1.5-12 车内照明灯的安装位置

1.3.3.1 室内灯

轿车采用的室内灯一般多安装在车顶的中部，具体的布置位置应尽可能让前、后座位的人都能操纵它的接通与断开。但在欧洲的一些轿车中只考虑前座位置使用方便，而往往把室内灯安装在车顶前边，图 1.5-13 所示为一种常见室内灯的安装位置。

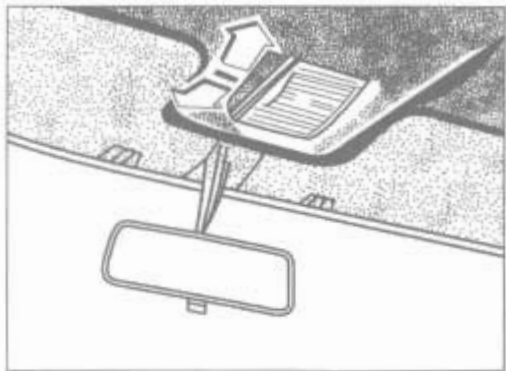


图 1.5-13 一种常见室内灯的安装位置

室内灯的灯光虽然在法规中没有要求，但一般要求室内灯能均匀地照亮整个车内，另外由于整车结构的要求，室内灯的厚度要尽量薄，所以，室内灯的灯泡多采用 5~10W 的管形灯泡。这种室内灯的结构如图 1.5-14 所示。

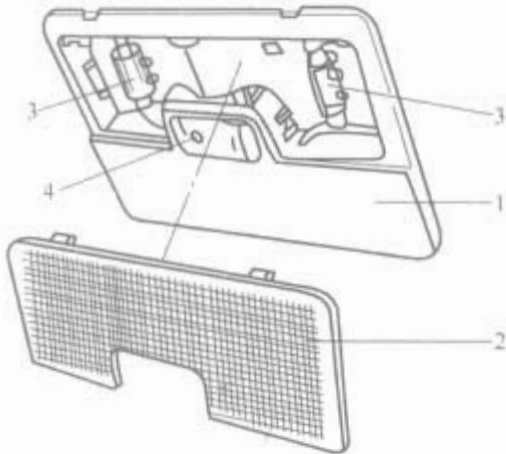


图 1.5-14 室内灯的结构
1—灯底板；2—室内灯配光玻璃；
3—灯泡；4—室内灯控制开关

室内灯的开关一般都与室内灯做在一个总成上，虽然对开关没有明确要求，但是几乎所有轿车用室内灯的开关都有三个工作位置：①OFF（断开），即熄灭室内灯；②ON（接通），即点亮室内灯；③DOR（门连锁），当任意一个车门打开或者没有关好时，室内灯都点亮，起到提醒驾驶员的作用。

对于大客车与货车，由于车顶高，车内面积大，为了让驾驶员与乘客舒适，车内照明效果好，室内灯多采用荧光灯管做光源。这种室内灯比使用白炽灯泡做光源的一般室内灯

具有亮度均匀、效率高、温度低和寿命长等优点。

1.3.3.2 地图灯

地图灯是为了驾驶员和乘客在夜间用来看地图和看文件的照明灯。对该灯的要求是在行车中其灯光不能影响驾驶员操作，因此，地图灯的灯光往往设计成圆锥塔形光束，灯光只照射在需要照亮的部位上，照射范围为 300~500mm 比较合适。地图灯的结构如图 1.5-15 所示。因为这种灯的照明范围很窄，所以要求它必须装有光轴方向的调节结构，以满足不同情况下的使用要求。

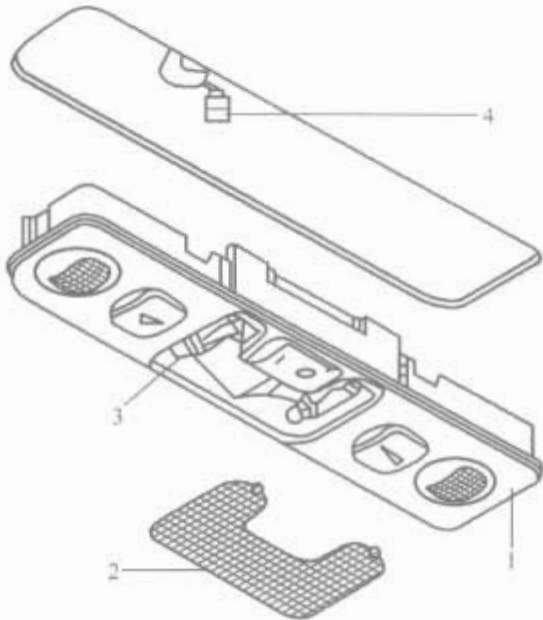


图 1.5-15 地图灯的结构
1—带地图灯配光玻璃的灯底板；
2—地图灯配光玻璃；3—灯泡；4—供电插头

地图灯的开关多数与灯做成一体，但也有将控制开关单独安装在仪表板或者门内护板的扶手上。这种地图灯的控制开关只有两个工作位置，即 ON 与 OFF。地图灯在车上的安装位置如图 1.5-15 所示。有些高级轿车把地图灯与室内灯做成一体，如图 1.5-16 所示。它既有室内灯的功能，又有地图灯的功能。由于这种灯的面积较大，因而它的室内灯一般采用环形或三角形荧光灯管做光源，地图灯采用白炽灯泡做光源。它们的控制开关也都安装在灯的总成上。室内灯的开关有三个工作位置，而地图灯的开关有两个工作位置。

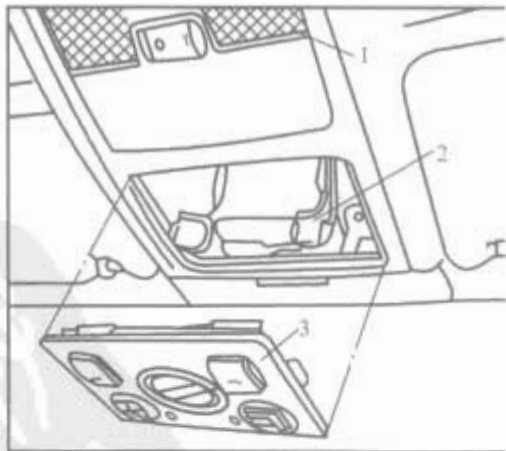


图 1.5-16 室内灯与地图灯
1—室内灯；2—插头；3—地图灯

1.3.3.3 阅读灯

阅读灯在功能上与地图灯相似，是为乘客看书和看文件设置的照明灯。但它在结构上比地图灯要简单，一般安装在座位的上方侧面，如图 1.5-12 所示。

阅读灯灯光照射面积比地图灯的灯光照射面积要大，要求照度要均匀，并且不允许给驾驶员和乘客（使用者）造成炫目感。阅读灯的控制开关多数与灯做成一体，其工作位置有三

个的也有两个的，当阅读灯控制开关多采用三个工作位置时，即 ON 和 OFF 和 DOR，其目的是当打开车门时，阅读灯自动点亮，以方便乘客上下车。具有两个工作位置的开关的阅读灯只有 ON 和 OFF，它不具备上面的功能，但它多用在室内灯安装在车顶中央或者有车门状态信号灯的轿车上。有的轿车把阅读灯开关安装在门上方的扶手或门内护板上。

1.3.3.4 门灯

门灯是为了在夜间车门打开时照亮车内脚下和车外地面，方便驾驶员和乘客上下车设置的；同时也能把车门打开后的车宽告知后续驶近车辆的驾驶员，起到信号灯的作用。由此可见，门灯在车门上的安装位置应尽量靠近车门的外侧下方，如图 1.5-12 所示，这样才能更体现出门灯的两个作用。

门灯的灯光颜色多采用半面白光半面红光，白光为为驾驶员和乘客上下车提供照明，红光是为提醒后续驶近车辆的驾驶员注意。门灯没有单独的控制开关，而是由车门联锁开关控制其点亮与熄灭。

1.3.3.5 踏步灯

踏步灯用在高级轿车上，一般安装在仪表板下和后座椅框前面，如图 1.5-17 所示，其作用是为驾驶员和乘客上下车时照亮车内脚踏处。踏步灯的点亮与熄灭是由车门联锁开关控制的，还有的在其控制电路中加灯亮时间的定时控制。

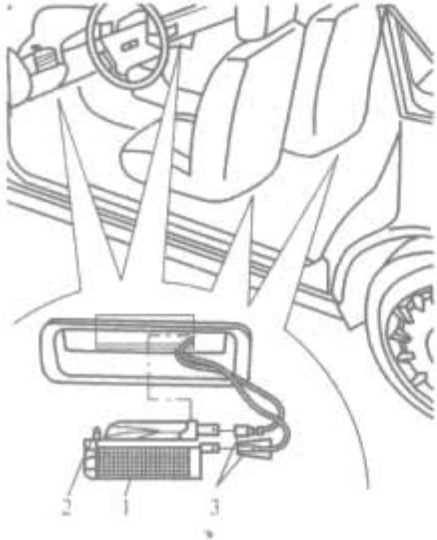


图 1.5-17 所示踏步灯的安装位置及结构
1—灯泡；2—定位凸起；3—供电插头

踏步灯的灯光不允许使驾驶员和乘客上下车时产生炫目，这就要求灯光必须向下照射，所以其安装位置要低。

1.3.3.6 行李箱灯

行李箱灯是为了方便装卸行李物品而设置的照明灯具。要求其灯光能照亮整个行李箱，为了不使灯光直接照射装卸者的眼睛，更不允许灯光射向后续驶近车辆内，同时又不能

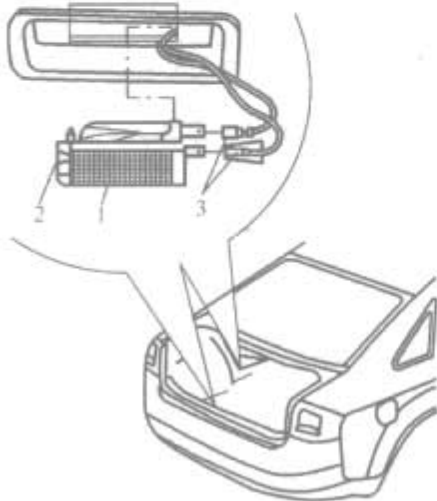


图 1.5-18 所示行李箱灯的安装位置及结构
1—行李箱灯；2—定位凸起；3—供电插头

示为奥迪轿车行李箱灯的具体安装位置及结构。

行李箱灯的点亮与熄灭是靠行李箱盖联锁开关控制的。当行李箱盖打开时，联锁开关自动接通电路将行李箱灯点亮；当行李箱盖关闭时联锁开关就断开行李箱灯电路而熄灭行李箱灯。

1.3.3.7 车内其他照明灯

仪表照明灯对夜间行驶的车辆保证安全起着重要作用，它必须为驾驶员提供足够看清仪表上的数字、刻度和指针的照明亮度，而且照明灯的光线与亮度不允许影响驾驶员的夜间驾驶。因此，仪表照明灯的灯光要求柔和而又不刺眼睛。

几乎所有的汽车仪表照明灯都与仪表板上的收音机、时钟及一些需要夜间操纵的控制开关的位置灯等照明灯光相协调，并且可以同步按其周围的环境亮度自由调整上述所有灯光的亮度，以适应不同驾驶员的习惯要求。

关于仪表照明灯的色调，世界各国已趋于多样化，但一般应选择符合人机学且辨认性好的色调。仪表照明灯的照明方式大体分为间接照明法、边灯照明法、直接照明法和透过式照明法，其中透过式照明法更多地应用于仪表照明。

仪表照明灯没有单独的控制开关，它是由车灯开关第一挡工作位置——与其夜行灯并联同时工作，但除开关控制点亮与熄灭外，在仪表内或仪表板上设置了一个专用灯光调整开关，以满足夜间周围环境不同亮度时，调节仪表照明灯亮度的需要。

(1) 杂物箱照明灯与烟灰盒照明灯。杂物箱照明灯是为方便驾驶员夜间在杂物箱内存放或寻找物品时提供照明的，这种照明灯的结构非常简单，安装在杂物箱的内壁上。杂物箱照明灯的点亮与熄灭是靠杂物箱盖联锁开关控制的，当车灯开关处在第一挡工作位置、杂物箱打开时，杂物箱照明灯会自动点亮；当杂物箱盖关闭时，杂物箱照明灯会自动熄灭。烟灰盒照明灯是为驾驶员与乘客夜间吸烟时设置的照明灯。当拉出烟灰盒时，烟灰盒照明灯会自动点亮；用完后推进烟灰盒时，烟灰盒照明灯便自动熄灭。它也是靠一联锁开关实现的。这种照明灯一般多安装在烟灰盒总成内，当照明灯点亮时不允许有光线照射出来，以免造成驾驶员和乘客的炫目。

(2) 化妆镜照明。化妆镜照明灯是为了驾驶员和乘客化妆时提供照明的一种灯具，它一般都安装在遮阳板的背面顶棚上。化妆镜照明灯的结构简单，设计得很薄，在照明灯总成上装有一个控制它点亮与熄灭的开关。

(3) 其他照明灯。由于有些专用汽车的不同功能要求，还需增设专用夜间照明灯。如高级豪华轿车内设置有酒柜、吧台，需要装备灯光柔和的照明灯；救护车为抢救急患者设置的简易手术台，这时需要在车内装备照度均匀的高亮度照明灯；工程车为了夜间户外抢修故障工程，需要设置亮度很高的聚光灯；边防越野车应设置辅助前照灯等。

1.4 照明系统的控制

1.4.1 光束可控型前照明系统原理

由前照灯、角灯和雾灯组成的前照明系统主要控制夜间照明的光形。该系统由车上各种传感器、开关、电子控制装置和灯具系统所用的传动机构以及灯具主体组成。

系统控制原理是所有的开关信号和传感信号都输入电子控制装置。输入的信号数据通过电子控制装置转换成前照明系统中各灯具的光束控制数据。如果其中有一个灯具的光束需要控制，用来控制该灯具光束的控制数据就被转换，然后被送到该灯具，通过传动机构和开关控制电路送往该灯具的控制数据启动配光部件，按光束的要求进行调光，传动机构内装有一个电

位计,该电位计向光束控制装置反馈传动机构的位移数据。

近光灯的控制方法是光束控制中最复杂的一部分,一般近光灯只有一个遮光罩,而该系统有三个,调节细微,其控制系统流程图如图 1.5-19 所示,

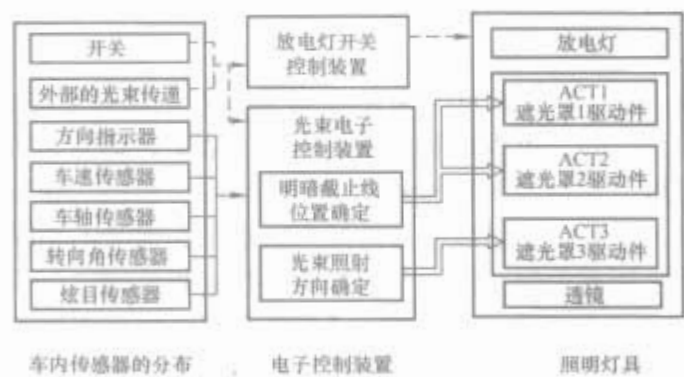


图 1.5-19 近光灯控制系统流程图

采用四灯制结构的前照明光束可变系统示意图如图 1.5-20 所示,其中:①高速公路,远光灯光束可加长;②一般路面,远光灯略缩短略变长;③会车,近光灯亮,但光束形状不变,不合此时照明要求;④近光光束改进,近光光束形状多种变化,加角灯辅助,适应会车时和十字路口照明要求;⑤雾、雪天。雾灯常为白色或黄色,辅助近光灯角灯共同照明。

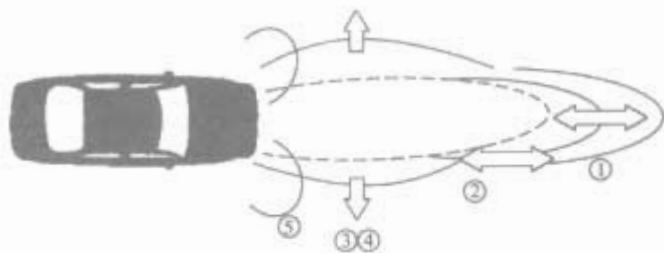


图 1.5-20 前照明光束可变系统

1.4.2 车身控制模块控制的照明系统

本节介绍一种车身控制模块控制的照明系统。
(1) 外部照明系统。车外照明系统包括前照灯(远、近光)、雾灯(前、后)、前驻车/转向信号灯/(标志灯)、后转向信号灯、尾灯/后标志灯、前位置指示灯、侧复示器灯、倒车灯、牌照灯和高位停车灯。该系统还包括所有操作这些灯所需的线路控制和硬件。

部分控制示意图如图 1.5-21~图 1.5-23 所示。

1) 前照灯。近光操作前照灯开关用于操作前照灯近光。前照灯开关在仪表板左侧。拉出前照灯开关按钮至最远位置即接通前照灯近光。远光操作转向信号灯/多功能开关用于操作前照灯远光。转向信号灯/多功能开关在转向柱左侧。向里拉转向信号灯/多功能开关手柄直至能感到后棘爪位置,然后松开手柄,能在前照灯远近光间进行转换操作,是远光还是近光则取决于起始点位置。远光指示灯在前照灯远光操作时,在仪表板中央组件上的远光指示灯会闪亮。

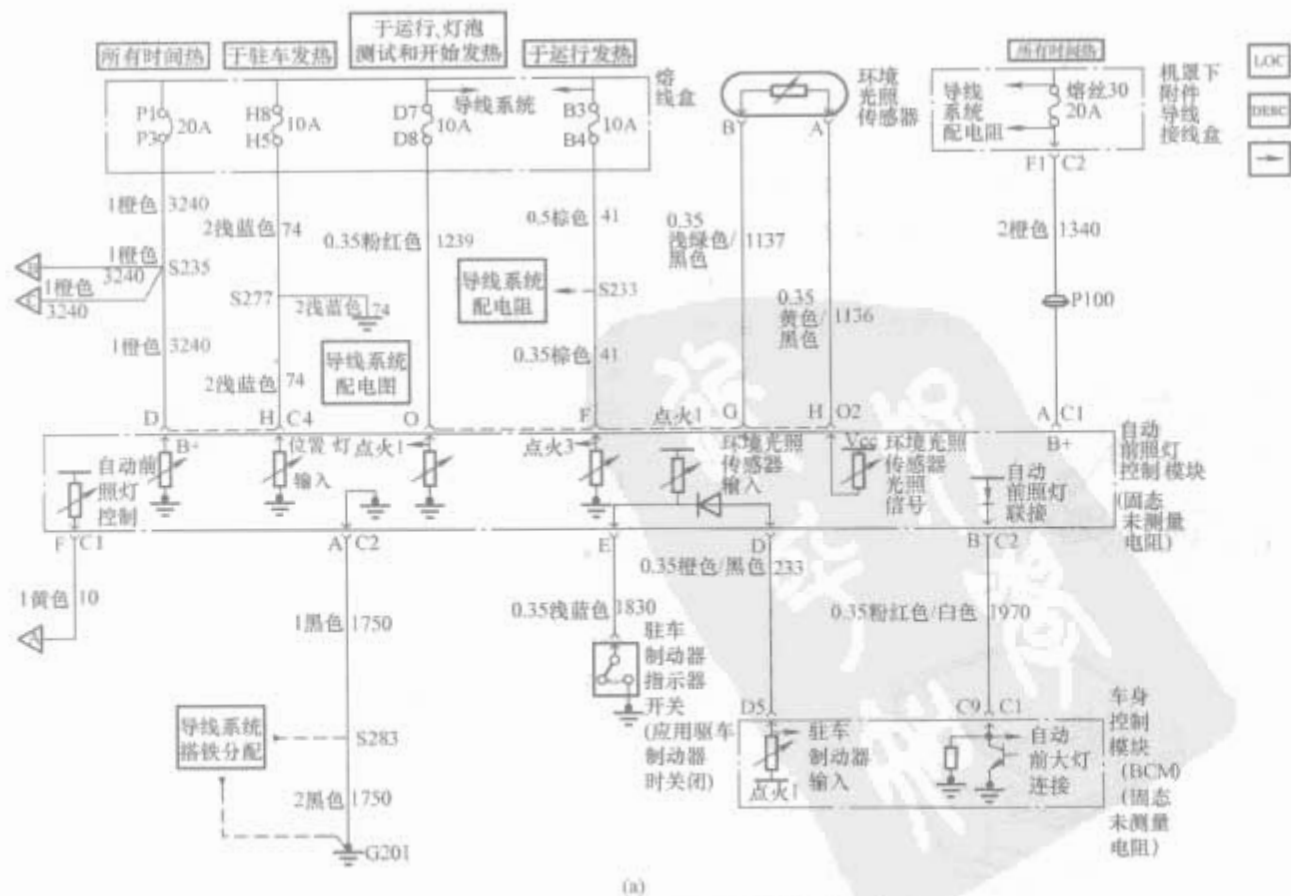
2) 超车闪光信号灯。操作转向信号灯/多功能开关在超车闪光信号灯模式中,还用于操作前照灯远光。将转向信号灯/多功能开关向里轻拉则开动前照灯远光。在该位置保持手柄则按需要固定在前照灯远光操作中。松开手柄时,则恢复前一个前照灯操作。超车闪光信号灯可用于前照灯是否接通或断开。

3) 雾灯(前后)。前雾灯位于前照灯总成下减振器仪表板内。后雾灯在后厢门缝饰内,靠近倒车灯。前、后雾灯开关在仪表板左侧前照灯开关下面。只要驻车灯启亮,按下前或后雾灯开关按钮则会接通前或后雾灯。当前、后雾灯任意一个接通时,各自雾灯开关上的指示灯则闪亮。再次按下开关,雾灯则断开。

4) 转向信号灯。前转向信号灯位于前照灯总成外侧。后转向信号灯位于尾灯总成内。在转向开始时,操纵转向信号灯/多功能手柄,前转向信号灯可同后转向信号灯一起闪亮。转向信号灯仅在点火开关在运行位置时操作,在危险信号灯工作时不操作。

5) 位置指示灯。位置指示灯位于前照灯总成中前照灯近光外侧。当前照灯开关任一接通位置时,位置指示灯均操作。

6) 侧复示器灯(前)。前侧复示器灯位于翼子板前部,外后视镜前下方。当通过转向信号灯/多功能手柄开始转向时,前侧复示器灯操作。若给出转弯信号,且前照灯开关处于关闭位置时,相应的前侧复示器灯会同前转向信号灯一致闪亮。若给出转弯信号,且前照灯开关处于任一接通位置时,相应的前侧复示器灯会同前转向信号灯交替闪亮。



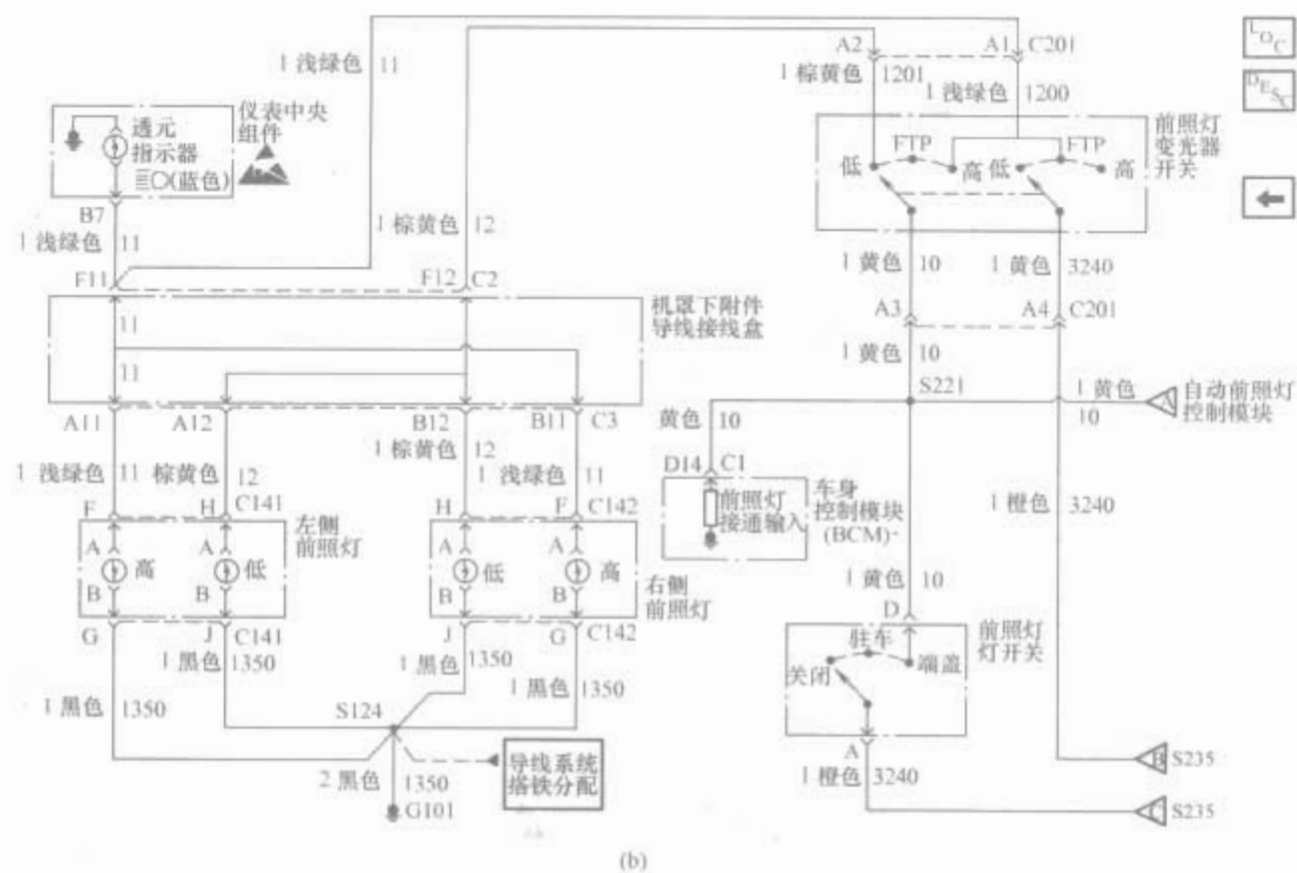


图 1.5-21 前大灯示意图例 (二)
(b) 前大灯、前大灯开关、前大灯变光器开关和车身控制模块

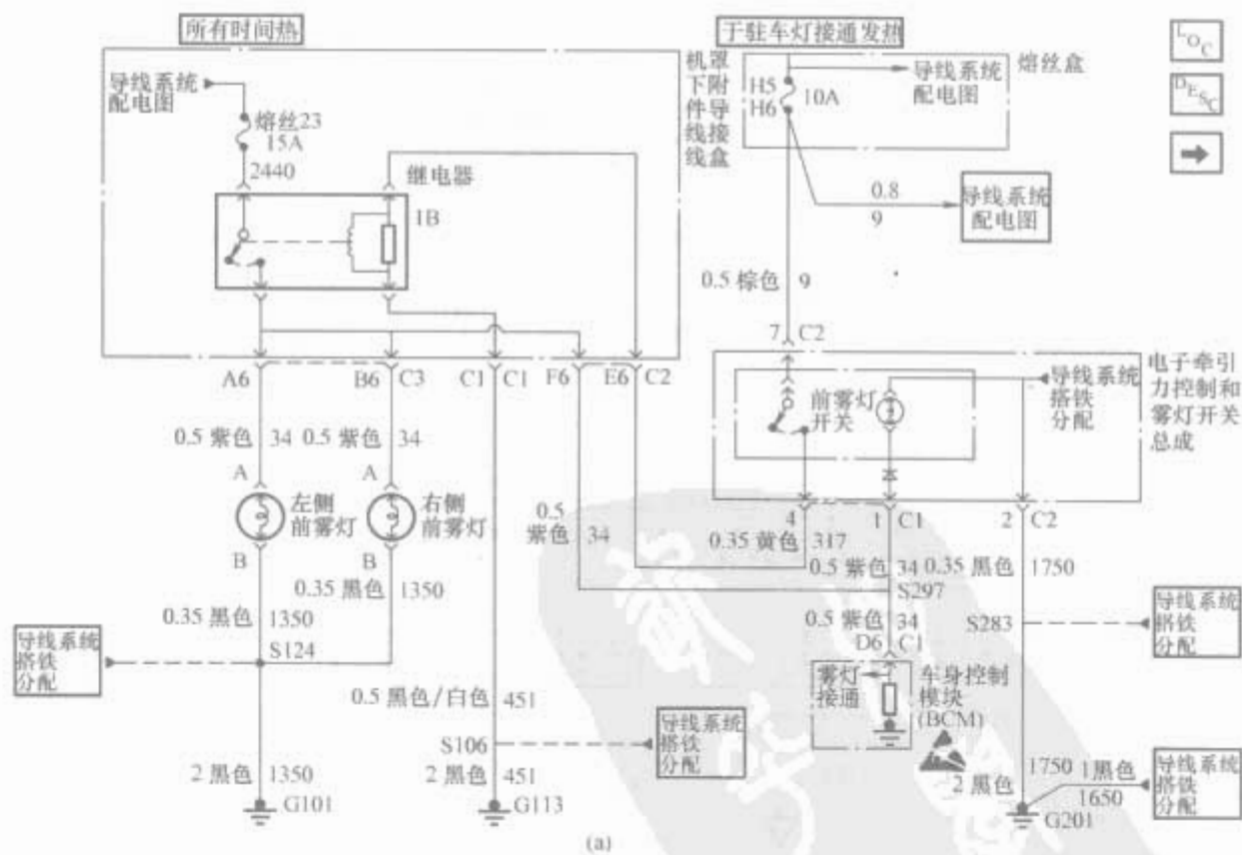


图 1.5-22 雾灯示意图例 (一)
(a) 前雾灯

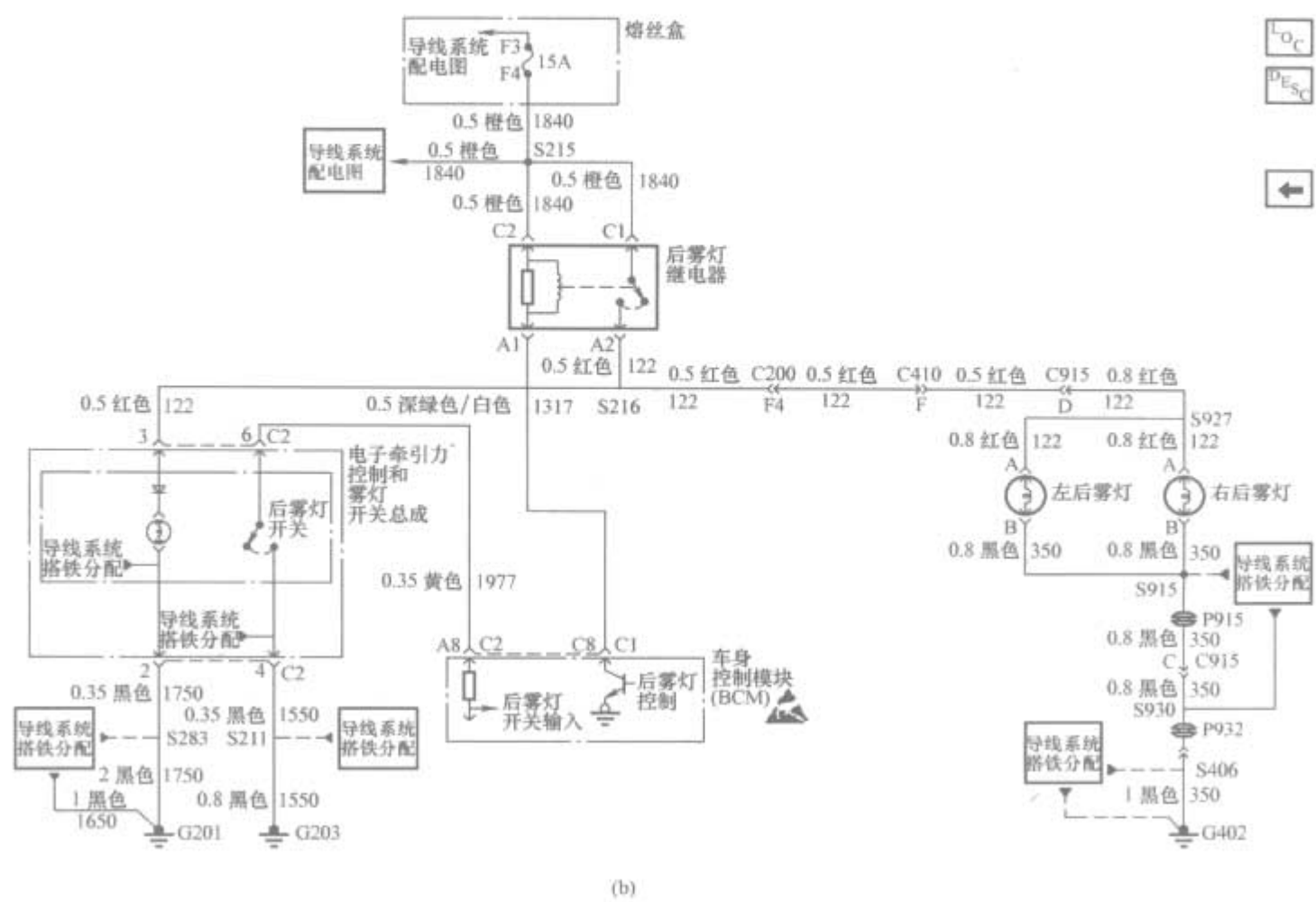


图 1.5-22 雾灯示意图例 (二)
(b) 后雾灯

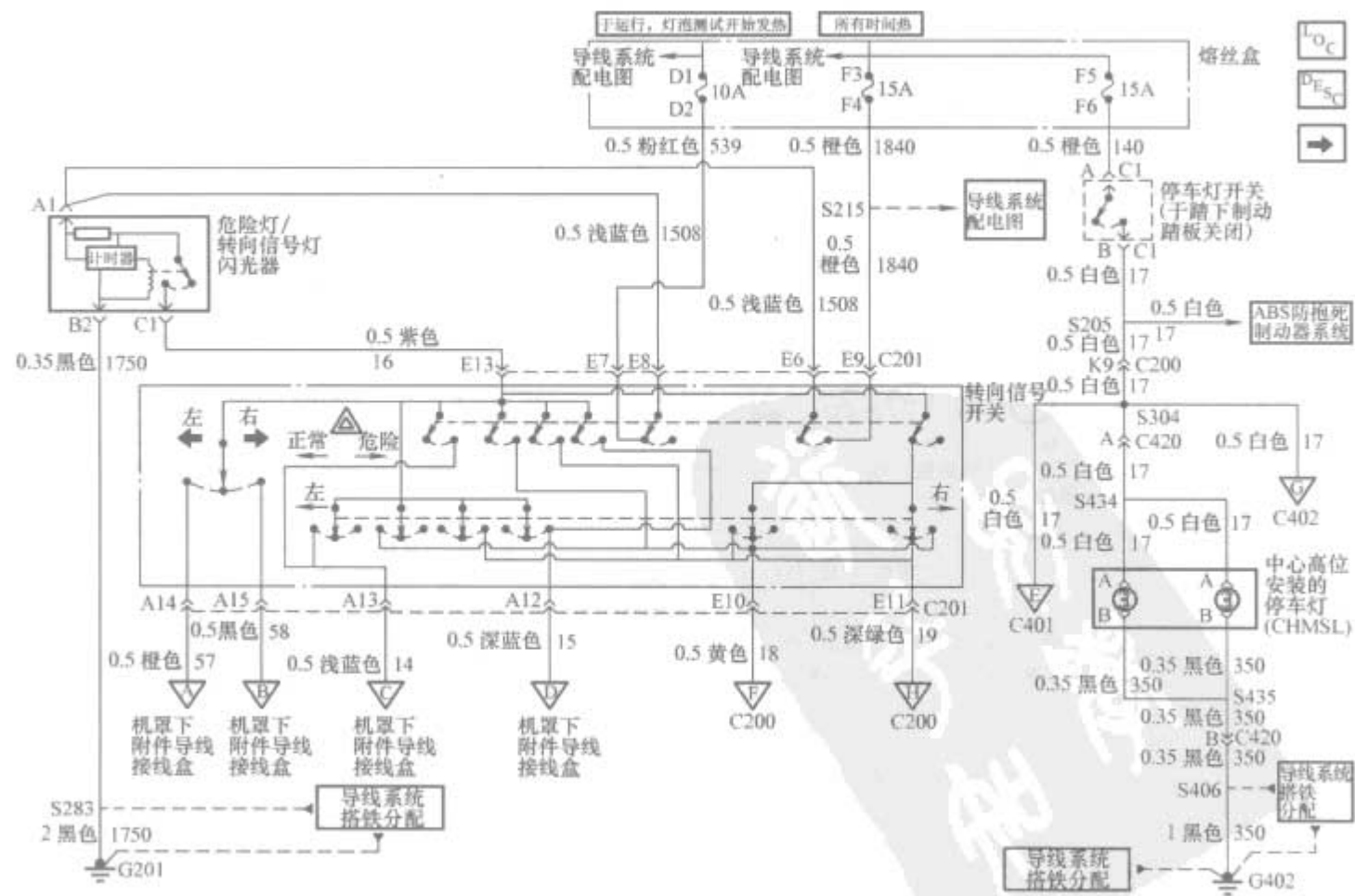
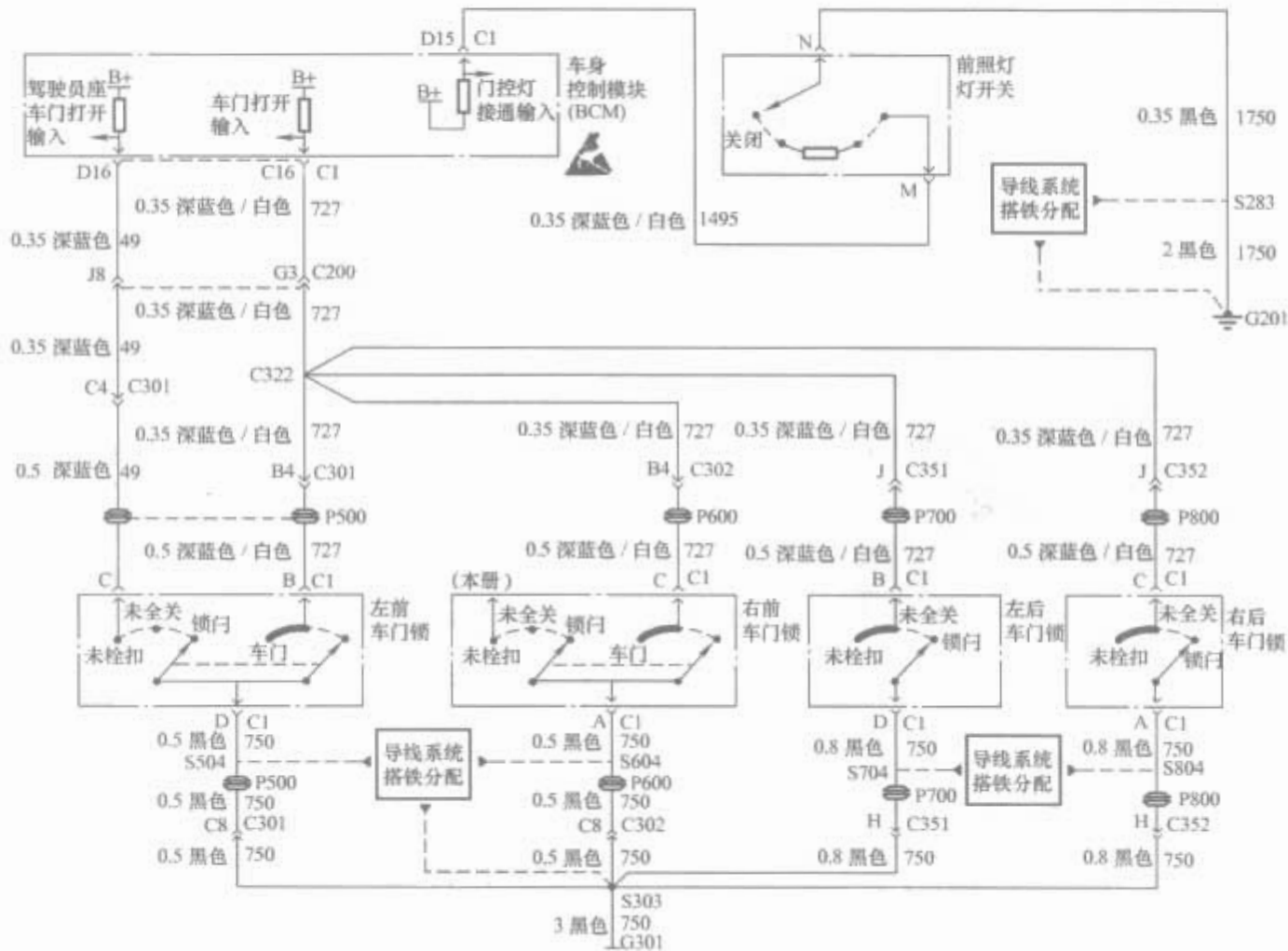


图 1.5-23 外部车灯示意图例

- 7) 尾灯。尾灯/停车灯/后标志灯和后转向信号灯一起位于后尾灯总成内。尾灯/后标志灯在前照灯开关处于任一接通位置时均操作。当通过转向信号灯/多功能手柄开始转向时，后转向信号灯同前转向信号灯一起闪亮。
- 8) 停车灯。只要踩下制动踏板，停车灯便点亮。
- 9) 倒车灯。倒车灯位于后厢门缝饰上。当点火开关位于运行位置且变速器驱动机构选档杆在倒挡时，倒车灯将点亮。

- 10) 高位停车灯。高位停车灯位于后行李架上，与后车窗下沿对中。每当踩下制动踏板时，高位停车灯均点亮。
- 11) 牌照灯。牌照灯位于后厢门缝饰上，且每当前照灯开关在任一接通位置时均点亮。
- (2) 内部照明系统。图 1.5-24 和图 1.5-25 所示为车身控制模块控制的车内照明系统电路图。该车内照明系统的控制主要功能有：



- 1) 车内照明。车身控制模块可以根据仪表盘左边的组合灯开关和各车门上的门控开关来控制室内灯。
- 2) 延迟照明。当所有车门都关闭后, 车身控制模块可以控制室内灯延长亮一段时间。
- 3) 退出照明。
- 4) 剧场式变光。车身控制模块可以控制室内灯由全亮逐渐变暗直至关闭。
- 5) 遥控门锁开锁照明。当驾驶员用遥控器遥控车辆时, 车身控制模块可以控制车内灯亮一段时间。
- 6) 意外载荷保护。

1.4.3 自动灯光系统电子电路

典型的汽车自动灯光系统主要由感光器(即传感器)、电子控制器(简称控制器)和选择开关三大部分组成。这些装置在车上的布置如图 1.5-26 所示。



图 1.5-26 典型的汽车自动灯光系统在车上的布置

照明灯控制电路如图 1.5-27 所示。感光器装在仪表板顶上, 光束透过挡风玻璃进入。感光器内有 Cds1 (黄昏用)、Cds2 (夜间用)、Cds3 (变光用) 三个光敏电阻, 随着感光强度的不断减少, 光敏电阻的电阻值不断增加。控制器装在仪表板内, 里面有 K1、K2、K3 三个继电器及晶体管放大电路, 控制各灯光电路的工作。选择开关装在仪表板上, 处在手动位置时指示灯亮, 按下开关至自动控制位置时, 指示灯熄灭, 表示自动灯光系统处于工作状态。选择开关下方有调整钮, 可用来调节灵敏度。

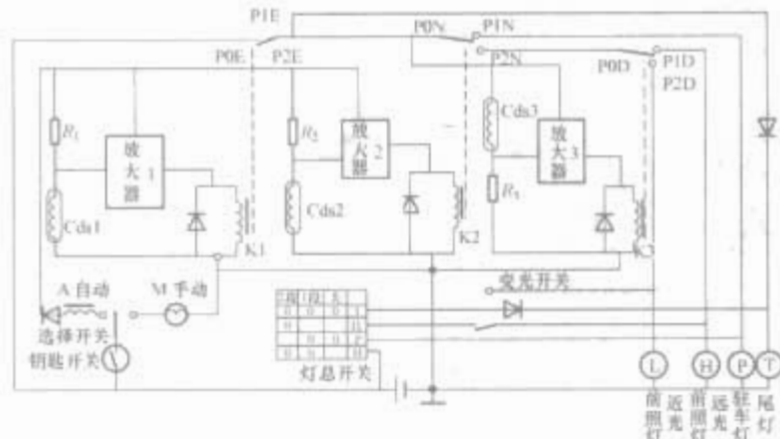


图 1.5-27 照明灯控制电路

如果灯光系统工作在自动挡, 黄昏行车时, 光敏电阻 Cds1 控制放大器 1 及 K1 所在点路导通, 使 P0E 与 P2E 接通, 从而使尾灯 T 点亮, 由于一般时候, P0N 与 P1N 接通, 因此, 驻车灯也同时点亮; 夜晚行车时, Cds2 控制放大器 2 及 K2 所在电路导通, 使 P0N 与 P2N 接通, 由于初始状态 P0D 与 P1D 接通, 从而使前照灯的远光 H 打开, 同时驻车灯灭; 会车时, Cds3 控制放大器 3 及 K3 所在电路导通, 使 P0D 与 P2D 接通, 从而使前照灯由远光变为近光; 会车结束后, Cds3 控制放大器 3 及 K3 所在电路断开, 使 P0D 与 P1D 接通, 从而使前照灯恢复远光; 当早晨到来时, Cds1、

Cds2、Cds3 所控制的电路均断开, 所有灯灭。

2 汽车仪表及报警指示装置

每辆汽车上都装备有一定数量的汽车仪表。各种仪表、指示灯及报警器是驾驶员了解汽车状态的不可缺少的部件。汽车电子仪表可随时反映出汽车各机件的运行状态和汽车上各种系统的有用信息, 为驾驶员正确使用汽车及安全驾驶提供了保证。

现代汽车的仪表板总成一般分成两部分, 一部分是指转向盘前的仪表板和仪表罩及平台, 另一部分是指驾驶员旁通道上的副仪表板。仪表板是安装指示器的主体, 集中了全车的监察仪表, 通过它们揭示出发动机的转速、油压、水温 and 燃油的储量, 灯光和发电机的工作状态, 车辆的现时速度和行驶里程等。有的仪表板还能显示变速挡位、时钟、车内外环境温度、路面倾斜和地面高度等信息。现代多数轿车将空调、音响等设备的控制部件安装在副仪表板上。这样既显得整体布局紧凑合理, 也能方便驾驶员的操作。

电子仪表板采用电子显示器件和高压驱动器集成电路等技术, 有些则采用全数字集成电路, 既提高了测试精度, 又可将数字信息输入汽车微机内, 实现了车速与里程等参数的数据分析和计算, 使汽车具有更多的自控功能。转速表、电压表、燃油表、油压表和水温表则采用线性集成电路, 方便配接各类电子传感器件。

2.1 电子仪表

2.1.1 转速表

转速表显示发动机曲轴转速。一种数字式发动机转速表电路如图 1.5-28 所示。这种转速表的组成为: 一个 U1 和 U2 等构成的输入信号调节器、一个脉冲计数器 U3、驱动两个电子显示装置 DISP1 和 DISP2 的两个显示驱动器 U4 和 U5、一个主时钟 U6 和一个电源稳压器 U7 等。其输入信号取自发动机点火系分电器中的断电器触点断开时产生的脉冲信号, 作为电路触发脉冲信号。电路中所有 +5V 电源均由稳压器 U7 提供, U7 的输入为汽车 12V 电源。该转速表以两位有效数字显示发动机转速。

2.1.2 车速表和里程表

车速表主要用来指示汽车行驶速度, 即利用车速传感器的测量信号, 计算并显示汽车时速的大小。车速计算方法通常有两种: ①计算固定时间内传感器输出的脉冲数量; ②测量固定脉冲周期所用的时间。脉冲数量计算方法是当集成电路或微机检测到来自传感器的脉冲数增加时, 就开始对代表车速的脉冲用计数器进行计数, 在设定时间内检测脉冲数量, 然后将计数器的数据和内存中的数据进行比较, 如果差值达到或超过每小时 1km 或更多时, 计数器的数据就输出到显示电路来刷新显示值, 整个过程不断重复。若测量时间很短, 从车速传感器测得的脉冲数就较少, 有时会产生较大误差, 因此大多数系统都采用每转产生 20 个以上脉冲的车速传感器。

最常见的车速表传感器是一种采用内置式光耦合器的车速传感器, 光耦合器由发出光线的发光二极管、接收光线的光敏三极管和一个开有 20 条可透过光线的窄槽的转轮组成。开槽转轮由常规车速表的软轴驱动, 其转速根据车速的快慢而变化, 发光二极管与光敏三极管相对安装于槽轮的上下两侧, 由槽轮隔开。当转轮转动时, 转轮断续地遮断发光二极管发射的光束, 使光敏三极管时通时断, 每当轮槽与发光二极管对准时, 发光二极管所发光束即通过轮槽到达光敏三极管, 光敏三极管便产生电压脉冲信号。

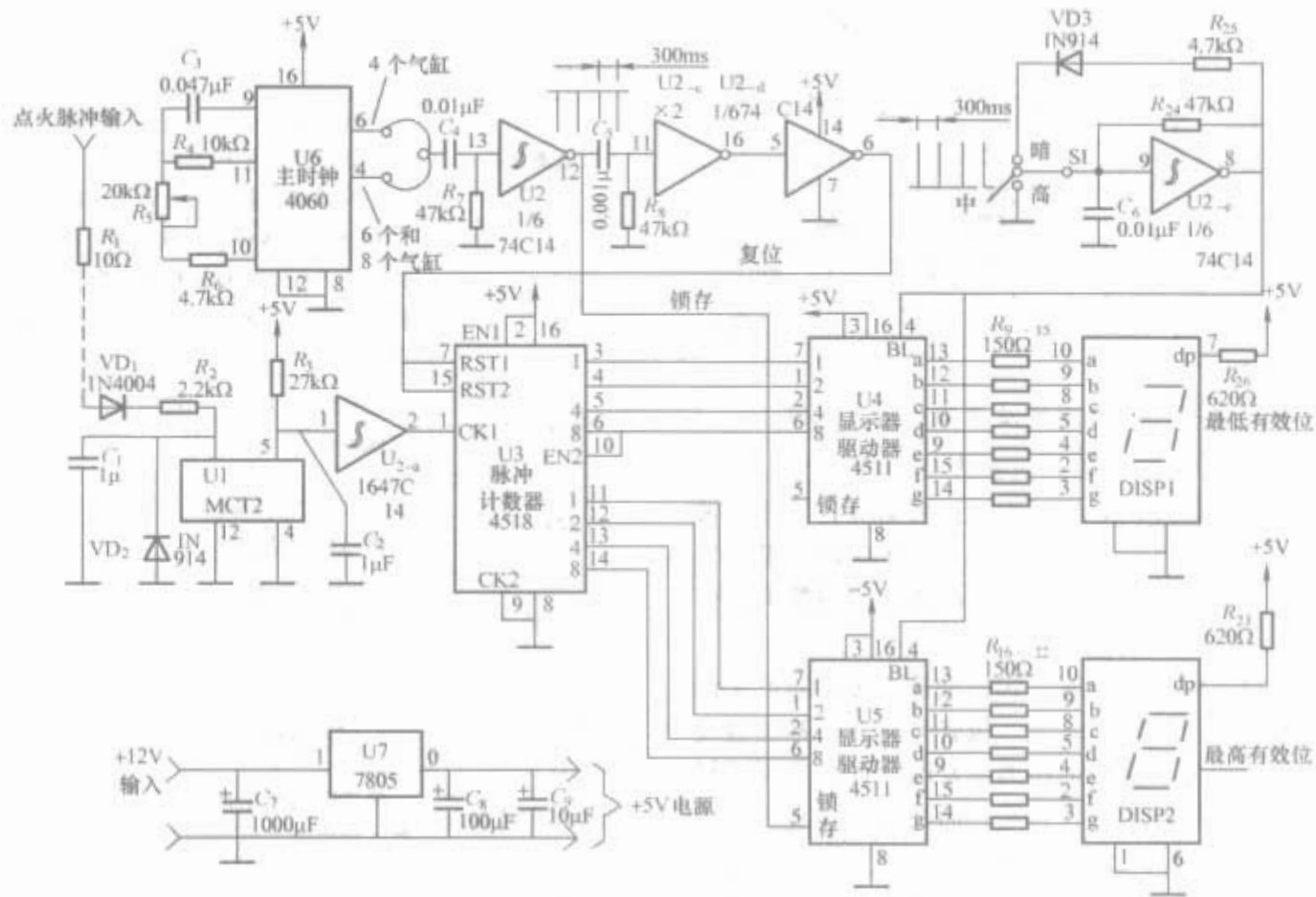


图 1.5-28 一种发动机转速表电路

车速表系统构成示意图如图 1.5-29 所示。无论前进还是后退，汽车的速度都能显示出来。速度单位通常可由驾驶员用按钮选择。

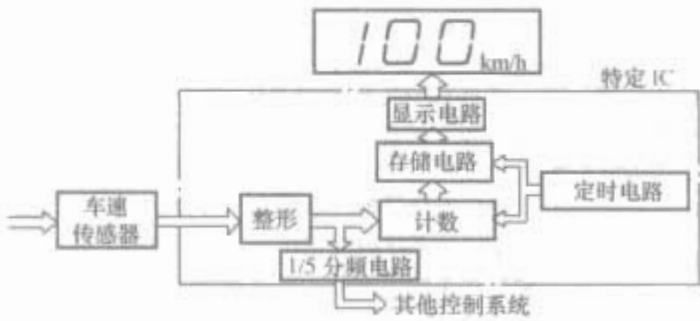


图 1.5-29 车速表系统构成示意图

汽车的里程表用于累计、储存和显示汽车所走过的路程，既有在需要的时候重新置值的短途表，也有用来指示汽车走过的总里程表。如果车速表采用内置式光耦合器传感器，里程表可能仍采用传统的结构。每次行驶里程是利用集成电路通过车速传感器所产生的脉冲信号来计算并存储汽车所走过的里程。累加各次行驶过的里程数，便可得到总里程数。

2.1.3 燃油表

电子燃油表可以随时测量并显示汽车油箱内的燃油情况，一般采用柱状或其他图形方式来提醒驾驶员油箱内可用的剩余燃油量。电子燃油表的传感器仍然采用浮子式滑线电阻器结构，由一个随燃油液高度而升降的浮子、一个带有电阻器的机体和一个浮动臂组成。传感器由机体固定在油箱壁上，当浮子随燃油液面的高度而升降时，带动浮动臂使接触片在电阻器上滑动，当在整个电阻外部接上固定电压时，燃油高度就可根据接触片相对地线的电压大小给出。

图 1.5-30 所示为一电子燃油表电路。 R_x 是浮子式滑线电阻器传感器，VD1~VD7 发光二极管作为显示器件。由 R_{15} 和 VD8 组成的串联稳压电路为各运算放大器提供作为基准电压的稳定电压，运算放大器 IC1 和 IC2 组成电压比较器。为了消除汽车行驶时油箱中燃油晃动的影响， R_x 输出端 A 点的电位通过 R_{16} 及 C_{47} 组成的延时电路加到 IC1 和 IC2 的同向输入端，并与基准电压进行比较并加以放大。

当油箱中燃油加满时，传感器 R_x 的阻值最小，A 点电位最低，IC1 和 IC2 电压比较器输出为低电平，此时绿色发光二极管都点亮，而红色发光二极管 VD1 熄灭，表示油箱中的燃油已满。

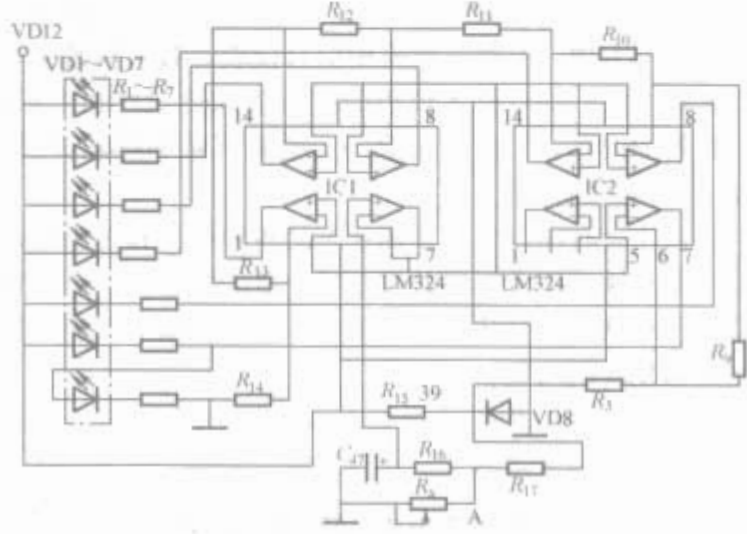


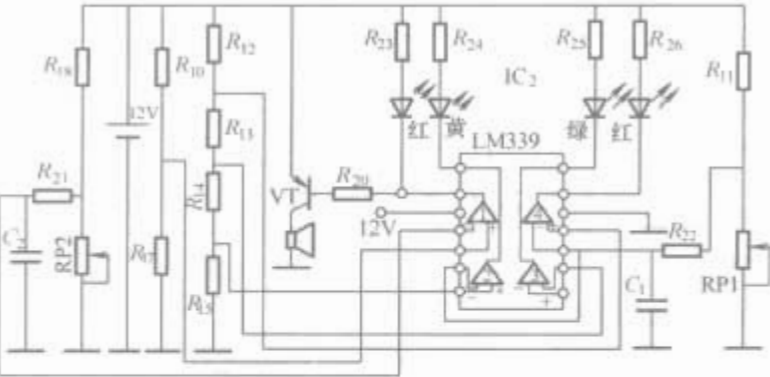
图 1.5-30 电子燃油表电路

当油箱中燃油量逐渐减少，显示器中绿色发光二极管按 VD7、VD6、VD5 等次序依次熄灭。油量越少，绿色发光二极管亮的个数就越少。

当油箱中燃油量达到下限， R_x 的阻值最大，A 点电位最高，IC2 的第 5 脚电位高于第 6 脚的基准电位，绿色发光二极管全部熄灭，红色发光二极管 VD1 点亮，提醒驾驶员补充燃油。

2.1.4 冷却液温度表及机油压力表

为了了解和掌握汽车发动机的工作情况，及时发现和排除可能出现的故障，汽车上均装有汽车发动机冷却液温度表和机油压力表。图 1.5-31 所示的电路具有显示发动机冷却液温度和机油压力两种功能。它主要由冷却液温度传感器、机油压力传感器、LM339 集成电路和红、黄、绿发光二极管显示器等组成。冷却液温度传感器装在发动机水套内，它与电阻 R_{11} 组成冷却液温度测量电路。机油压力传感器装在发动机主油道上，与电阻 R_{18} 组成机油压力测量电路。



当冷却液温度低于 40℃ 时，黄色发光二极管亮；当冷却液温度在正常工作温度时，绿色发光二极管亮；当冷却液温度超过 95℃ 时，发动机有过热危险，红色发光二极管发光报警，同时由三极管 VT 控制的蜂鸣器也发出报警声响信号。

当机油压力过低时，双金属片式机油压力传感器产生的脉冲信号频率最低，此时红色发光二极管亮，并由蜂鸣器发出声响报警信号；当发动机机油压力正常时，绿色发光二极管亮，表示发动机润滑系统工作正常；而在油压过高时，机油压力传感器产生的脉冲信号频率较高，黄色发光二极管亮，以引起驾驶员的注意，防止润滑系统故障，尤其是注意防止润滑系各部的垫子被冲和润滑装置损坏。

2.2 组合仪表

上述分装式汽车仪表具有各自独立的电路，具有良好的磁屏蔽和热隔离，相互间影响较小，具有较好的可维修性。缺点是不便采用先进的结构工艺，所有仪表加在一起体积过大，安装不方便。有些汽车采用组合仪表，其结构紧凑，便于安装和接线，缺点是各仪表间磁效应和热效应相互影响，易引起附加误差，为此要采取一定的磁屏蔽和热隔离措施，还要进行相应的补偿。

组合仪表有用以显示车辆状态的各种仪表和传感器，有用以监视车辆不正常现象并告知驾驶员的警告灯，有告知驾驶员显示车辆各部分状况的指示灯，还具有调节仪表和传感器照明和亮度的功能。

各组成元器件及其功能见表 1.5-18。图 1.5-32 所示为一种组合仪表的线路图。

名 称	功 能
车速表	指针根据来自车速传感器的信号而移动，指示车速
转速表	指针根据来自点火器的信号而移动，指示发动机的转速
水温表	指针根据来自水温传感器的信号而移动，指示发动机冷却水的温度
燃油表	指针根据来自燃油出油传感器的信号而移动，指示燃油箱内所剩燃油的量
里程表	根据车速传感器的脉冲信号记录车辆已行驶的总里程
双程里程表	根据车速传感器的脉冲信号，记录车辆行驶的距离，它可通过一开关复位并用以切换 A 和 B 两个单里程表
冷阴极管	配有两个冷阴极管，作仪表用并置于组合仪表的后面，供组合仪表照明用

续表	
名 称	功 能
电源组件	电源具有流经保险的稳压电路，向车速表、转速表、燃油表和里程表供电，另外电源还有一个产生高压交流的电路和灯光调节电路，点燃冷阴极管
电路板	包含所有各仪表、传感器、警告灯和指示灯电路，它不仅有发动机机油位警告驱动电路，还有里程表、单里程表的驱动电路以及指示灯的亮度调节电压电路
转速传感器	安装在变速器上，根据输出轴转数向组合仪表发送脉冲信号
双程开关	此开关的作用是切换 A 和 B 两个单里程表及复位信号输至组合仪表
水温传感器	该传感器将发动机冷却得温度转换成一电阻信号发送至组合仪表
燃油传感器	该传感器将燃油箱内燃油的液面位置转换成电阻信号发送至组合仪表
变阻器灯控制盒	将变阻器的电阻值输入组合仪表和变阻灯控制器，用以调节组合仪表的照明度
变阻器灯控制器	该控制器根据变阻器灯控制盒输出的电阻，调节照明灯的亮度
燃油位警告开关	该开关与燃油传感器置于一体，当剩余的燃油面降至某一规定平面以下时，开关导通，警告灯亮
低机油压力警告开关	该开关置于发动机机体上，当机油压力过低时，开关导通，警告灯亮
座位安全带警告继电器	来自 GAUGE 和 DOME 熔丝的电流流经此继电器与各个系紧开关
灯控开关、钥匙开锁警告器	座位安全带警告系统的一部分，当座位安全带未系紧时该系统就发出声音，警告灯亮，作为钥匙开锁警告系统的部分，当达到设定状态时也发出声音
灯故障传感器	当后组合灯的灯泡出现故障时，该传感器即感知，并点亮警告灯
冷却液位警告开关	该开关置于散热器水箱内，当冷液位过低时，警告灯亮
冷却液位警告 ECU	它位于组合仪表和冷却液位警告开关之间，它将来自开关的信号延时，以防止冷却液冷开关闭合时警告灯突亮
发动机机油位置警告开关	该开关置于发动机油底壳内，当发动机机油油位过低时，警告灯亮
制动油位警告开关	该开关置于制动缸储油箱内，当制动油位过低时，警告灯亮
驻车制动开关	该开关置于制动踏板上，当踩下踏板时，开关导通，警告灯亮
门控灯开关	当某扇门开启时，开关导通，警告灯亮
警告灯总成	该总成置于仪表组件内，当某警告灯亮时，某灯光就投射到仪表玻璃上，产生一影像
真空开关	该开关用以检测发动机进气歧管内的真空和起动仪表内经济行驶监控器的运行
灯泡检查继电器	仅在起动器工作时，点亮制动警告灯，检查本灯泡状况
警告灯	当车辆出现某种不正常现象时，电流会流过这些灯，或者当这些灯接地时，会使它们发亮
指示灯	当电流流过这些灯时，或者这些为接地灯时，它们即发亮，并向驾驶员指示车辆的状态

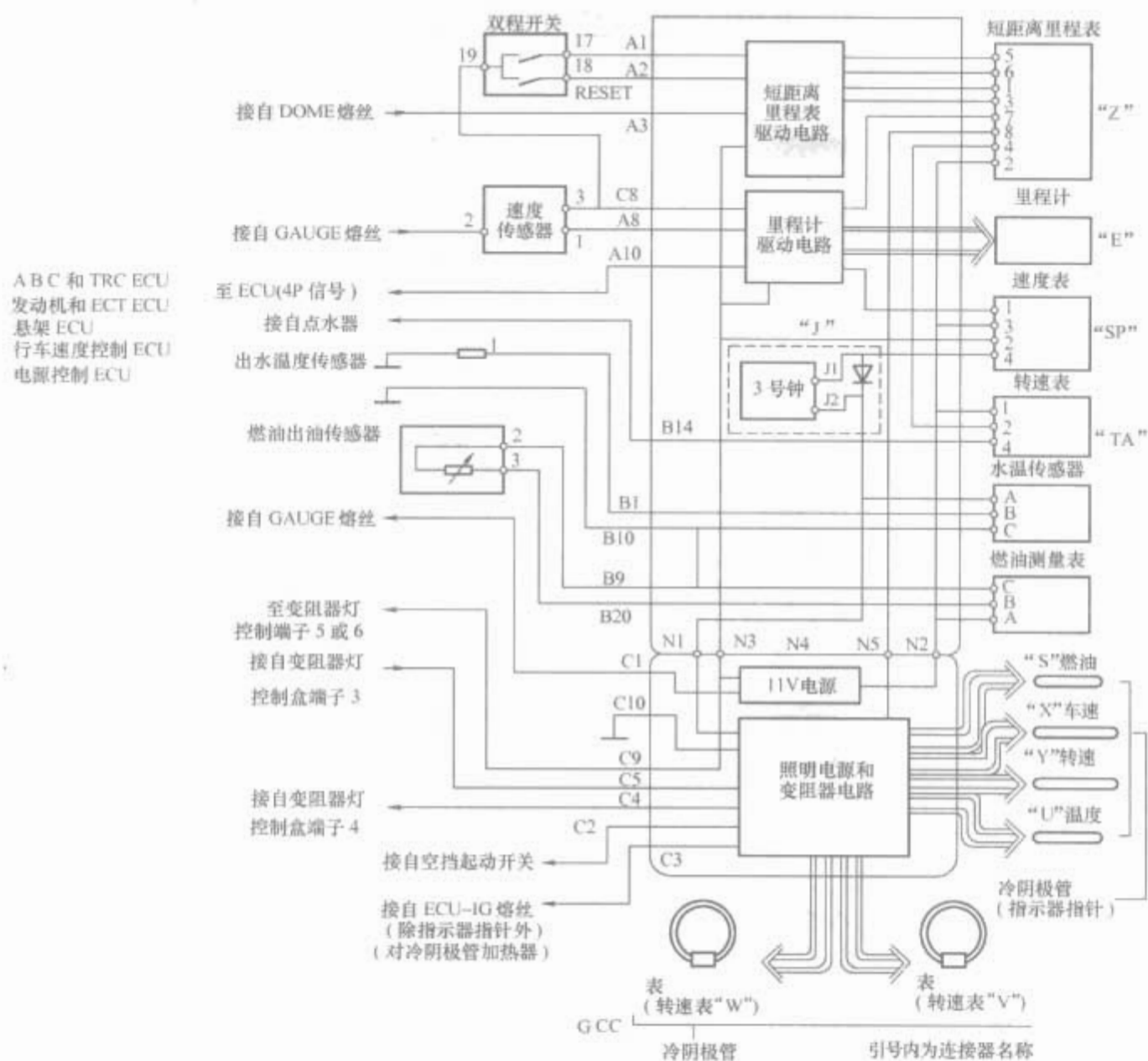


图 1.5-32 一种组合仪表的线路图

2.3 报警指示装置

2.3.1 作用及符号

为了警示汽车、发动机或某一系统处于不良或特殊状态，引起驾驶员的注意，保证汽车可靠工作和安全行驶，防止事故发生，汽车仪表板上安装了多种报警装置。

报警装置由报警灯和报警开关组成，当被监测的系统或总成工作不正常时，开关自动接通而使报警灯亮，以提醒驾驶员注意，如水温报警灯、机油压力报警灯、燃油不足报警灯、气压不足报警灯、制动灯断线报警灯、液面过低报警灯等。报警灯通常安装在仪表板上，功率为 1~4W，在灯泡前设有滤光片，使报警灯发出黄光或红光，滤光片上通常制有标准图形符号。有些汽车报警灯采用发光二极管显示，标准图形符号标在发光二极管旁边。

常见报警灯图形符号、作用及检查方法见表 1.5-19。

2.3.2 主要报警装置

2.3.2.1 蓄电池报警装置

(1) 蓄电池液量报警系统。蓄电池液量报警系统的作用是，在蓄电池液量不足时，报警灯点亮而向驾驶员发出报警信号。该系统由安装在蓄电池内的液量传感器与晶体管电路构成，其中液量传感器为电极式液面高度传感器，由安装在蓄电池盖板上的铅棒构成。当把传感器的电极置于蓄电池电槽中时，它在该电槽中具有与蓄电池阴极相同的作用，也将产生电动势。如果使其电极长度与电解液规定液面位置下限处吻合，则实际液面高于该位置时产生电动势，低于该位置时不产生电动势。

图 1.5-33 (a) 所示是蓄电池液面正常时电路状态。此

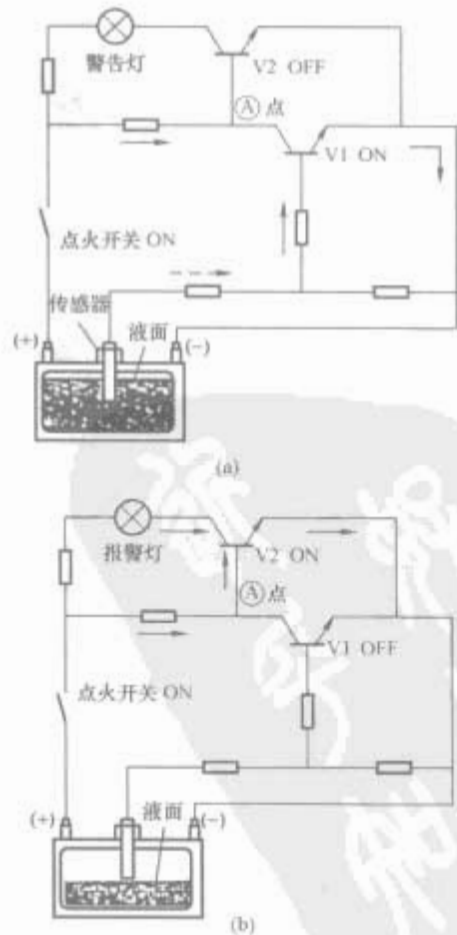


图 1.5-33 蓄电池液量报警电路
(a) 液面正常时；(b) 液量不足时

表 1.5-19 报警灯、指示灯的图形符号含义及检查

序号	名 称	图 形	颜色	灯泡 (W)	作 用	灯泡断路检查
1	蓄电池液面过低报警灯		红	1~4	蓄电池的液面比规定量低时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
2	机油压力过低报警灯		红	1~4	发动机机油压力在 0.03MPa 以下时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
3	充电指示灯		红	1~4	硅整流发电机不发电时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
4	预热指示灯		黄	1~4	点火开关闭合时灯亮, 预热结束时灯灭	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
5	燃油滤清器积水报警灯		红	1~4	燃油滤清器内积水时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
6	远光指示灯		蓝	1~4	使用前照灯远光时灯亮	接通远光灯时灯亮
7	散热器液量不足报警灯		黄	1~4	散热器的液量比规定的少时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
8	转向指示灯		绿	1~4	开转向灯时灯亮	开转向灯时灯亮
9	驻车制动报警灯		红	1~4	驻车制动器起作用时灯亮	拉紧驻车制动手柄时灯亮
10	车轮制动器失效报警灯		红	1~4	制动器失效时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
11	燃油过少报警灯		黄	1~4	燃料余量约在 10l 以下时, 灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
12	安全带报警灯		红	1~4	不管是否装上安全带扣, 发动机起动后约 7s 灯灭	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
13	车门未关报警灯		红	1~4	车门打开或半开时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
14	制动灯或后示位灯失效报警灯		黄	1~4	制动灯或后示位灯断路时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
15	洗涤器液面过低报警灯		黄	1~4	洗涤器液面过低时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮
16	安全气囊报警灯	AIR BAG	黄	1~4	安全气囊失效时灯亮	接通点火开关, 灯亮 6s 后灭
17	制动防抱死失效报警灯	ABS	红	1~4	ABS 电控部分有故障时灯亮	接通点火开关, 灯亮 3s 后灭
18	发动机故障报警灯	 CHECK	红	1~4	发动机电控系统有故障时灯亮	发动机停止时, 由于点火开关接通灯亮

时由于传感器浸入蓄电池中，传感器的铅棒与蓄电池的负极桩间产生电动势差，晶体管 V1 基极流过电流处于导通状态。蓄电池电流按图中箭头方向从正极桩经过点火开关、晶体管 V1 流向蓄电池负极桩。由于 A 点电位接近于零，晶体管 V2 的基极与发射极之间电位相等，没有电流从 V2 的基极流过，晶体管 V2 处于断开状态，报警灯不亮。

图 1.5-33 (b) 所示是蓄电池液量不足的电路状态。此时蓄电池液面低于规定的高度，由于传感器未浸入蓄电池液中，不能产生电动势差，晶体管 V1 基极无电流流过而处于断开状态。同时，又由于 A 点电位升高，电流按箭头方向流过晶体管 V2 基极，从而使 V2 处于导通状态、报警灯点亮，通知驾驶员蓄电池液量不足。

(2) 蓄电池电压监视电路。不同工况下的蓄电池端电压可反映出其工作状态的好坏。为了使驾驶员随时监视汽车电源的工作状态，有的汽车装了蓄电池电压监视电路。监视电路的结构原理如图 1.5-34 所示。

该电路的主要元件是 1 个 TCA965 型窗口比较器集成电路，监视电压的范围通过 3 个可调电阻进行选择，显示器是 3 个不同颜色的发光二极管。

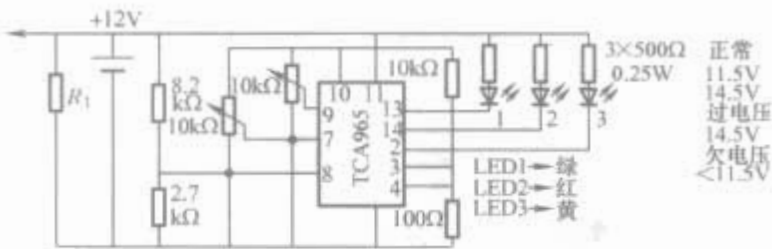


图 1.5-34 蓄电池电压监视电路

2.3.2.2 水温故障报警装置

水温过高报警灯电路如图 1.5-35 所示，其报警开关为双金属片式温度开关。当冷却水温正常时，双金属片几乎不变形，触点断开，报警灯不亮。如果冷却水温升高到 95~105℃ 以上时，双金属片由于温度升高而弯曲变形，使触点闭合，红色报警灯便通电点亮，提醒驾驶员采取适当降温措施。

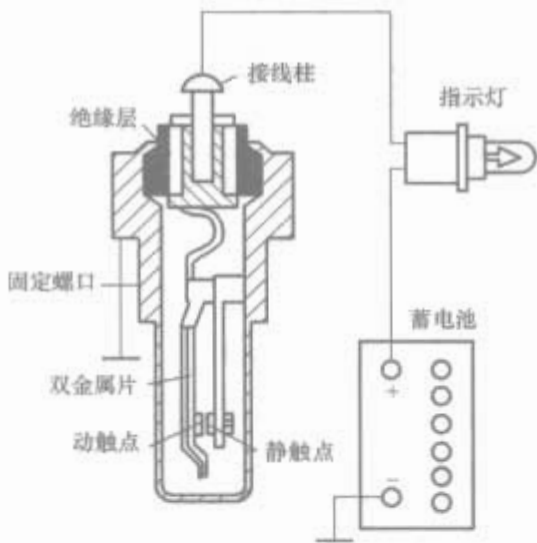


图 1.5-35 水温报警灯电路

2.3.2.3 燃油油量报警装置

燃油不足报警灯电路如图 1.5-36 所示。其报警开关为热敏电阻式，装在油箱内。当油箱内燃油量多时，负温度系数的热敏电阻元件浸没在燃油中散热快，温度较低，电阻值较大。因此电路中几乎没有电流，报警灯不亮。而当燃油减少到规定值以下时，热敏电阻元件露出油面，散热较慢，温度升高，电阻值减小，电路中电流增大，则报警灯点亮，提醒驾驶员及时加注燃油。

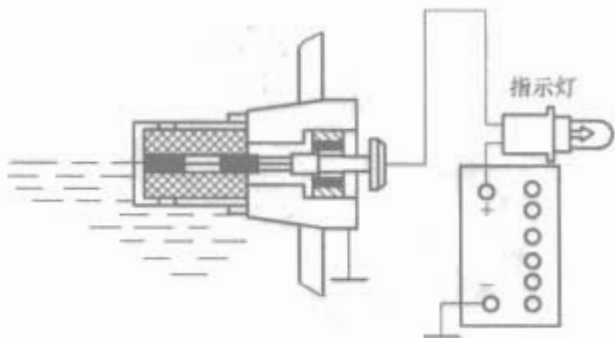


图 1.5-36 燃油不足报警灯

2.3.2.4 制动灯断线报警灯装置

制动灯断线报警灯电路如图 1.5-37 所示。在正常情况下制动时，踩下制动踏板，制动灯开关接通，电流分别流经左、右两电磁线圈使左、右制动信号灯亮。此时，两线圈所产生的磁场相互抵消，弹簧开关触点断开，报警灯不亮。若左（或右）制动信号灯线断开或灯丝烧断时进行制动，则左（或右）电磁线圈无电流通过，而通电的线圈所产生的电磁吸力吸动弹簧开关，其触点闭合，报警灯发亮，表示制动灯电路有断路故障。

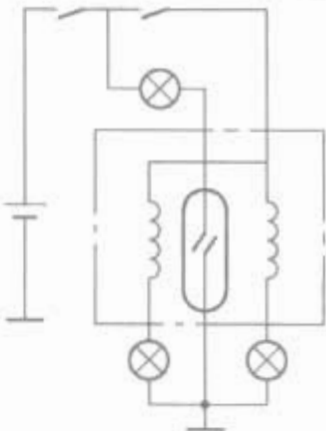


图 1.5-37 制动灯断线报警灯

2.3.2.5 气压不足报警灯

制动气压不足报警电路如图 1.5-38 所示。气压不足报警开关装在储气筒或制动阀压缩空气输入管中。接通电源，当储气筒内的气压下降到 0.35~0.38MPa 时，由于作用在气压报警开关膜片下方的空气压力减小，于是膜片在复位弹簧的作用下向下移动，而使触点闭合，电路接通，报警灯点亮；当储气筒中的气压升到 0.45MPa 以上时，由于膜片下方气压增大，而使复位弹簧压缩，触点断开，电路切断，报警灯熄灭。行车中气压不足报警灯突然亮时，应立即停车，查找原因，排除故障，使气压恢复正常值。

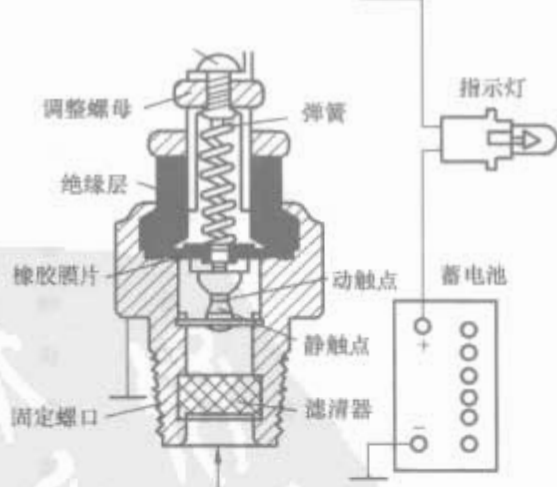


图 1.5-38 气压过低报警电路

3 汽车空调系统

汽车空调系统按其功能可分为制冷系统、加热系统、通风与空气净化系统和控制系统等几个主要组成部分。空调系统的组成如图 1.5-39 所示。

(1) 制冷系统。采用蒸汽压缩式制冷原理，对车内空气或由外部进入车内的新鲜空气进行冷却或除湿，使车内空气变得凉爽舒适。

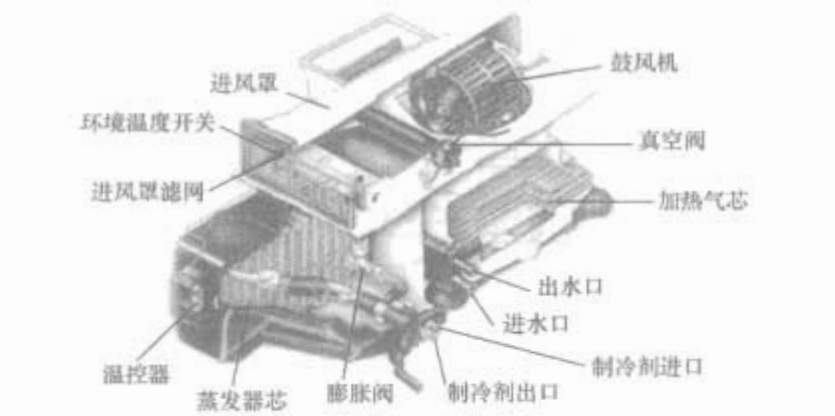


图 1.5-39 空调系统的组成

- (2) 加热系统。采用热水式加热装置，利用发动机冷却水给车内空气或由外部进入车内的新鲜空气加热，以达到取暖、除湿的目的。在冬天还可以给前挡风玻璃除霜、除雾。
- (3) 通风装置。离心式鼓风机将外部新鲜空气吸进车内，对车内空气进行置换，以达到制冷、加热及通风的功效。通风装置除鼓风机外，还有滤清器、进风口、风道及出风口。
- (4) 空气净化系统。除去车内空气中的尘埃臭味，使空气清新，简单的方法是在通风口处加装灰尘滤清器。先进的轿车上还装有空气质量传感器，当空气质量不良时，使初步过滤的气流再通过活性炭阀门，进一步净化。
- (5) 加湿装置。在气温较冷时，对车内空气加湿，使车内空气相对湿度达到 40%~50%。
- (6) 操纵控制系统。该系统主要由电气元件、真空机构和操纵机构组成。一方面对制冷系统、加热系统的温度和压力进行控制并进行安全保护，同时对车内空气温度、风量及出风方向进行控制。自动空调系统就是指操纵控制系统自动化。

把上述各部分的全部或部分组合在一起安装或单独安装在汽车上，便组成了汽车空调系统，轿车上多采取组合式。加湿装置、空气净化装置和强制通风装置一般只在高级轿车和大客车上采用。部分新型车空调对比见表1.5-20。

表 1.5-20 部分新型车空调对比					
车 型	自动恒温空调系统	空调花粉过滤器	自动空调	前排空调通风口	后座空调通风口
本田 思域				●	●
宝马 523i	●	●	●	●	●
本田 思迪				●	●
东风标致 206			●	●	●
帕萨特 领驭	●	●	●	●	●
一汽大众 速腾	●	●	●	●	●
中华 骏捷				●	●
福特 福克斯	●			●	●
现代 雅绅特	●			●	●
丰田 锐志	●			●	●
别克 君越	●	●		●	●
铃木 雨燕				●	●
马自达3 2.0				●	●
三菱 欧蓝德				●	●
奔驰 E200K	●	●	●	●	●

续表					
车 型	自动恒温空调系统	空调花粉过滤器	自动空调	前排空调通风口	后座空调通风口
日产 THIDA 骐达			●	●	●
奥迪 A6	●	●	●	●	●
本田 雅阁				●	●
丰田 皇冠	●	●	●	●	●
奥迪 A4	●	●	●	●	●

注 ●表示有此装置。

轿车空调所采用的这种整体冷暖组合式，其特点是能将冷风和暖气根据需要按适当的比例混合在一起，空气调节为再热混合式调节型式，这种型式是把经过冷却降温除湿后的空气再将其小幅度提高温度，进一步降低湿度，达到使人舒服的程度。这种再加热型的轿车空调，要求制冷系统有较大的冷却能力，以便加大空气的预冷深度，为再加热储备冷量。

空调系统在车上的布置，如图 1.5-40 所示。

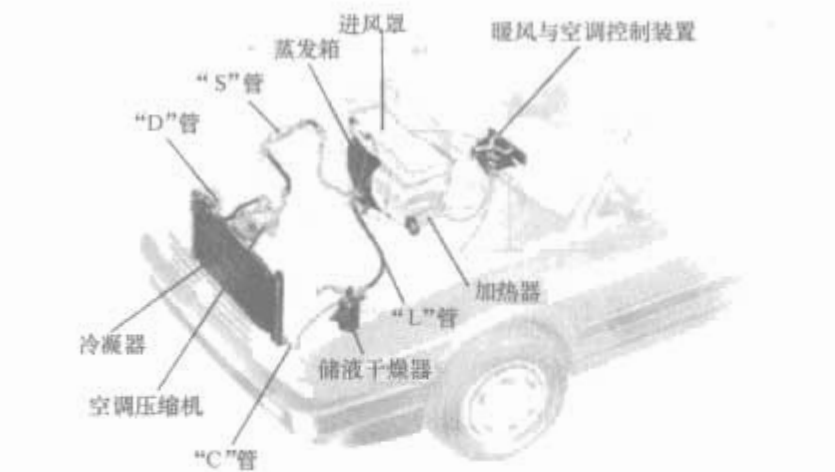


图 1.5-40 空调系统在车上的布置

3.1 相关技术参数

汽车空调相关技术参数见表 1.5-21~表 1.5-23。

表 1.5-21 汽车空调设备技术参数		
项 目	规格 参 数	
型 式	仪表板型	行李箱型
压缩机型式	往复式轻合金制	斜板式铝合金
冷风能力 (kJ/h)	17 974 (2400r/min)	27 588 (2000r/min)
压缩机气缸数 (个) × 容积 (L)	2×102	6×171
压缩机驱动方式	三角带传动，附电磁离合器	
压缩机安全装置	在高低压压力差为 3MPa 时作用	
蒸发器型式	散热片及管式 (全部铝制)	
蒸发器送风量 (m³/h)	350 (最大)	500 (最大)
鼓风电动机功率 (V/W)	12/60	12/65 (2 个)
风量调节	三挡转换式	
温度调节	热敏电阻式自动调节温度	
冷凝器型式	散热叶片及管式	全部铝制波纹式
防止过热装置	怠速自动调整装置	
制冷剂	R12	

独立式汽车空调机组结构性能参数表

序 号	产 品 型 号	适 用 车 型	结 构 特 性					性 能 参 数						生 产 厂 家			
			型 式	配 用 压 缩 机 型 号	配 用 发 动 机 型 号	冷 凝 器	蒸 发 器	外 形 尺 寸 (mm×mm×mm) 长×宽×高	制 冷 量 (kW)	制 热 量 (kW)	压 缩 机		空 气 调 节 量 (m³/h)		噪 声 (dBA)	适 用 工 质	总 质 量 (kg)
											转 速 (r/min)	功 率 (kW)					
1	KQFZ1 I	25 座小型客车	独立 整体式	SD-510	276K	管片式	管片式	1528×612×588	11.62	—	3000	—	2700	—	R12	—	岳 阳 恒 立 冷 气 设 备 股 份 有 限 公 司
2	KQFD1 I A	25 座小型客车	独立 顶置式	SD-510	276K	管片式	管片式	顶置：1650×1400×290	11.62	—	3000	—	2700	—	R12	—	
3	KQFN1 I	25 座小型客车	独立 内置式	SD-510	276K	管片式	管片式	蒸：1400×450×240 冷：1280×450×436	11.62	—	3000	—	2700	—	R12	—	
4	RQFZ18	30~40 座中型客车	独立 整体式	FK4	480 柴	管片式	管片式	2270×1105×843	18.60	—	1900	8.5	3000	—	R12	—	
5	KQFD18 II	30~40 座中型客车	独立 顶置式	FK4	480 柴	管片式	管片式	顶置：3000×1280×245	18.60	—	1900	8.5	3600	—	R12	—	
6	KQFN18	30~40 座中型客车	独立 内置式	FK4	480 柴	管片式	管片式	蒸：1460×300×140 冷：1250×450×420	18.60	—	1900	8.5	3600	—	R12	—	
7	KQFZ24	50~60 座大型客车	独立 整体式	FK4	480 柴	管片式	管片式	2270×1105×843	24.41	—	2400	11.6	3500	—	R12	—	汉 水 车 辆 空 调 设 备 总 厂
8	CK240DD	50~60 座大型客车	独立 顶置式	05G	480 柴	管片式	管片式	3500×1300×250	28	—	2000	11	4000	—	R12	—	
9	CK100AD	17~25 座小型客车	独立 内置式	A6	475 柴	管片式	管片式	蒸：1100×417×226	12	—	2800	5	1400	—	R12	—	

表 1.5-23 非独立式汽车空调机组结构性能参数表

序 号	产 品 型 号	适 用 车 型	结 构 特 性						性 能 参 数							生 产 厂 家	
			型 式	配 用 压 缩 机 型 号	配 用 发 动 机 型 号	冷 凝 器	蒸 发 器	外 形 尺 寸 长×宽×高 (mm×mm×mm)	制 冷 量 (kW)	制 热 量 (kW)	压 缩 机		空 气 调 节 量 (m³/h)	噪 声 (dBA)	适 用 工 质		总 质 量 (kg)
											转 速 (r/min)	功 率 (kW)					
1	KQFZ3.6	轿车	通用 选装型	SD-508	—	管片式	管片式	蒸：428×305×140 冷：613×362×113	3.48	—	1800	—	1800	—	R12	—	岳 阳 恒 立 冷 气 设 备 股 份 有 限 公 司
2	KQZN7	12 座小型客车	非独立 内置式	SD-508	—	管片式	管片式	蒸：841×300×146 冷：780×304×208	5.97	—	2200	—	900	—	R12	—	
3	KQZN9.3	17 座小型客车	非独立 内置式	SD-510	—	管片式	管片式	蒸：1276×430×146 冷：800×304×208	9.3	—	2490	—	1800	—	R12	—	
4	KQZD9.3	17 座小型客车	非独立 顶置式	SD-510	—	管片式	管片式	顶置：1400×1400×290	9.3	—	2400	—	1800	—	R12	—	
5	KQZD11B	25 座小型客车	非独立 顶置式	SD-510	—	管片式	管片式	顶置：1650×1400×290	11.62	—	3000	—	2700	—	R12	—	
6	KQZN11	25 座小型客车	非独立 内置式	FK3	—	管片式	管片式	蒸：1360×460×240 冷：717×386×380	11.62	—	3000	—	2700	—	R12	—	
7	KQZD18Ⅱ	30~40 座中型客车	非独立 顶置式	FK4	—	管片式	管片式	顶置：3000×1280×245	18.60	—	1900	8.5	3600	—	R12	—	
8	KQZH24	50~60 座大型客车	非独立 后置式	FK4	—	管片式	管片式	蒸：1935×770×390 冷：2110×610×310	24.41	24.40	2400	11.6	5400	—	R12	—	
9	KQZD24	50~60 座大型客车	非独立 顶置式	FK4	—	管片式	管片式	顶置：3400×1280×245	24.41	—	2400	11.6	5400	—	R12	—	
10	KQZD5.6	工程车	非独立 顶置式	SD-508	—	管片式	管片式	顶置：680×830×260	5.58	—	1800	—	1150	—	R12	—	
11	KQZNR3.4	EQ140 EQ1090	非独立 内置式	SD-507	—	管片式	管片式	蒸：408×325×140 冷：613×362×113	3.4	3.4	1800	—	400	—	R12	—	
12	KQFNR3.4	吊车	非独立 内置式	SD-507	—	管片式	管片式	—	3.4	4.6	1500	—	400	—	R12	—	
13	KQZNR4.6	重型车	非独立 内置式	SD-508	—	管片式	管片式	—	4.6	—	1800	—	900	—	R12	—	
14	BK-Ⅱ44	轻型货车、轻型客车	冷暖 合一	SD-507	—	管片式	管片式	447×370×150	4.0	4.3	1800	2.57	450	≤60	R12	6.2	北 京 汽 车 空 调 制 造 厂

续表

序 号	产 品 型 号	适 用 车 型	结 构 特 性						性 能 参 数						生 产 厂 家		
			型 式	配 用 压 缩 机 型 号	配 用 发 动 机 型 号	冷 凝 器	蒸 发 器	外 形 尺 寸 长×宽×高 (mm×mm×mm)	制 冷 量 (kW)	制 热 量 (kW)	压 缩 机 转 速 (r/min)	功 率 (kW)	空 气 调 节 量 (m³/h)	噪 声 (dBA)		适 用 工 质	总 质 量 (kg)
15	BK-Ⅱ448	五十铃系列车	冷暖 合	SD-507	—	管带式	管带式	265×255×280	4.0	4.07	1800	2.57	420	≤60	R12	3.0	北京汽车空调制造厂
16	BK-Ⅱ44A	轻型货车、轻型 客车、改装车	冷暖 合	SD-507	—	管带式	管带式	395×358×146	4.0	4.07	1800	2.57	450	≤60	R12	6.2	
17	BK-Ⅱ56	北京切诺基	冷暖 合	SD-510	—	管带式	管带式	—	5.47	6.0	1800	3.2	450	≤60	R12	12.5	
18	轻型客车 冷气装置	轻型客车系列	—	SD-510	—	MQL-4	MQZ-4	蒸：1400×534×215 1240×380×340 冷：830×240×335	9.0	—	1800	6	1100	<68	R12	80	河南豫新机械有限公司
19	工程车 冷气装置	工程车系列	—	SD-508	—	GQL-4	GQZ-4 GQZ-7	蒸：454×412×230 626×190×432 冷：614×352×43.3 564×354×43.5	4.5	5.2	1800	2	480	<69	R12	29	
20	WQT1	微型车系列	—	SS-10V SS-96D	—	WQL-1 WQL-2	WQZ-1	蒸：202×147×328 冷：400×30.4×132	3	2.58	1100	1.23	240	≤67	R12	17.6	
21	KQZN2.8	长安奥拓轿车	—	JSY-76	—	管带式	管带式	—	2.8	—	1800	1.4	260	≤65	R12	15	重庆建设集团公司
22	KQZN3.5	天津夏利轿车	—	JSY-96	—	管带式	管带式	—	3.5	—	1800	2.1	360	≤65	R12	17	
23	KQZ9.3	17~30座客车	—	DKS-26 SD-510	—	管带式	管带式	蒸：1446×585×233 1534×585×235 冷：826×382×380	9.3	—	2000	4.2	1500	70	R12	68	南京汽车空调机厂
24	QKR-38Y	轻型车	—	SD-507 SD-508	—	—	—	1280×500×420	3.8	4.18	1800	2.4	700	65	R12	23	电子部第十六研究所汽车 空调器厂
25	QKR-40Y	轻型越野乘用车	—	SD-510 SD-508	—	—	—	940×375×384	4.0	1.88	1800	3	570	65	R12	28	
26	KQZN2.5	EQ1090 EQ1092	—	SD-507	—	—	—	—	2.9	—	1800	1.7	350	65	R12	5.1	东风—派思汽车铝热交换 器有限公司

续表

序 号	产 品 型 号	适 用 车 型	结 构 特 性						性 能 参 数							生 产 厂 家	
			型 式	配 用 压 缩 机 型 号	配 用 发 动 机 型 号	冷 凝 器	蒸 发 器	外 形 尺 寸 长×宽×高 (mm×mm×mm)	制 冷 量 (kW)	制 热 量 (kW)	压 缩 机		空 气 调 节 量 (m ³ /h)	噪 声 (dBA)	适 用 工 质		总 质 量 (kg)
											转 速 (r/min)	功 率 (kW)					
27	YQK36	轿车、轻型 客车、货车	—	SD-508	—	L2219 1418	YQZ36	—	—	—	1800	—	430	≤62	R12	—	广东阳江华阳汽车空调设 备有限公司
28	ISK40	五十铃系列	—	SD-508	—	ISL3216 1418	ISZ43	—	4.0	—	1800	—	400	≤62	R12	—	
29	XLK32	夏利轿车	—	—	—	XLJ221 61417	XLZ32	—	3.0	—	1800	—	330	≤62	R12	—	
30	KJS-35	桑塔纳轿车	—	SD-508	—	管带式	管带式	—	4.9	5.2	1800	2.45	420	—	R12	—	上海汽车空调厂
31	KLW-35	五十铃轻型车	—	SD-507	—	管带式	管带式	—	3.5	4.7	1800	1.6	360	—	R12	—	
32	KJB-55	北京切诺基	—	SD-709	—	管带式	管带式	—	5.5	5.8	2450	2.5	440	—	R12	—	
33	KQZN9.6	6600 型客车	内装式	3F-5	—	管带式	管带式	1745×646×221	9.65	—	500~ 3000	3.5	—	<65	R12	75	上海万众车用空调设备厂
34	KQZN9.6Ⅱ	6560 型客车	内装式	3F-5	—	管带式	管带式	1745×646×221	9.65	—	500~ 3000	3.5	—	<65	R12	75	
35	KQZD5.7	仿日海狮客车	内装式	SD-510	—	管带式	管带式	1082×362×123	5.7	—	500~ 3000	3	—	<65	R12	26	
36	KQZN5	仿日兰地斯客车	内装式	SD-510	—	管带式	管带式	420×300×155	5	—	500~ 3000	3	—	<65	R12	—	上海万众车用空调设备厂
37	KQZD26	55 座豪华旅游车	顶置式	FK4	—	管带式	管带式	3950×1280×170	26.5	—	500~ 3000	11.5	—	<75	R12	245	
38	KQZD13	25 座中型旅游车	顶置式	FK3	—	管带式	管带式	2500×1280×170	13.7	—	500~ 3000	5.6	—	<75	R12	153	
39	KQZD4.1	双排座货车	顶置式	SD-510	—	管带式	管带式	1180×930×195	4.1	—	500~ 3000	3	—	<75	R12	42	沙市电工仪器仪表工业公司
40	ZX13.6	神龙富康轿车	内装式	SD-508	—	管带式	管带式	—	3.6	4.8	1800	—	360	<56	R12	20	

3.2 空调制冷系统

3.2.1 汽车空调制冷系统的工作原理

汽车空调制冷系统由压缩机、冷凝器、储液干燥器、膨胀阀、蒸发器和鼓风机等组成。如图 1.5-41 所示，各部件之间采用铜管（或铝管）和高压橡胶管连接成一个密闭系统。制冷系统工作时，制冷剂以不同的状态在这个密闭系统内循环流动，每个循环有四个基本过程：

(1) 压缩过程。压缩机吸入蒸发器出口处的低温低压的制冷剂气体，把它压缩成高温高压的气体排出压缩机。

(2) 放热过程。高温高压的过热制冷剂气体进入冷凝器，由于压力及温度的降低，制冷剂气体冷凝成液体，并放出大量的热。

(3) 节流过程。温度和压力较高的制冷剂液体通过膨胀装置后体积变大，压力和温度急剧下降，以雾状（细小液滴）排出膨胀装置。

(4) 吸热过程。雾状制冷剂液体进入蒸发器，因此时制冷剂沸点远低于蒸发器内温度，故制冷剂液体蒸发成气体。在蒸发过程中大量吸收周围的热量，而后低温低压的制冷剂蒸气又进入压缩机。

上述过程周而复始地进行，便可达到降低蒸发器周围空气温度的目的。

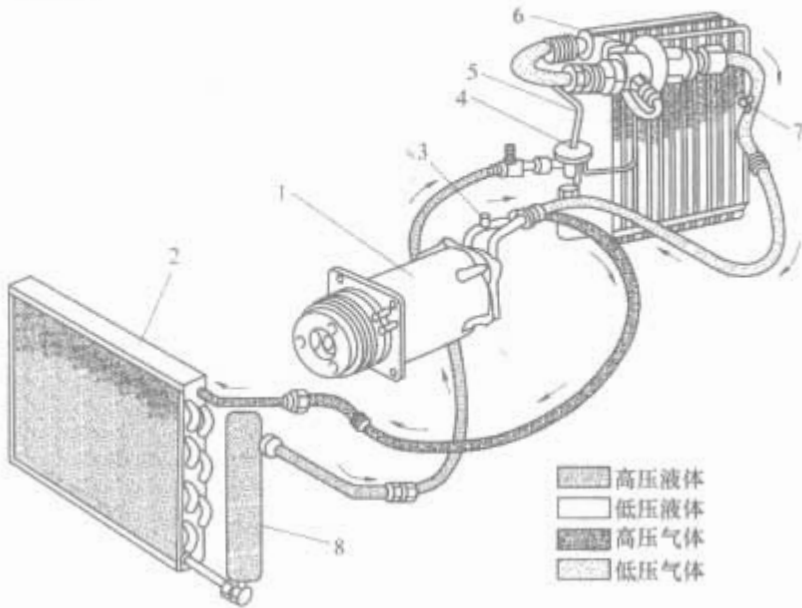


图 1.5-41 汽车空调制冷系统

1—压缩机；2—冷凝器；3—高压维修阀口；4—膨胀阀；
5—蒸发器；6—吸气节流阀；7—低压维修阀口；8—储液器

3.2.2 汽车空调系统分类

汽车空调系统一般分两类：循环离合器系统和蒸发器压力控制系统。循环离合器系统又分为循环离合器膨胀阀系统和循环离合器孔管系统（CCOT），如图 1.5-42 所示。膨胀阀系统和孔管系统有两个主要区别：①储液干燥器位置不同；②节流装置不同。

膨胀阀系统也叫做传统空调系统，其特征是：只要驾驶员一开动空调，电磁离合器就总是啮合，从不断开，压缩机始终处于运行状态，靠吸气节流阀或靠绝对压力阀控制蒸发器温度。孔管系统也叫做循环离合器系统，其特征是，电磁离合器时而啮合，时而断开，压缩机根据车室内、外温度时而运行，时而停止。循环离合器系统也有使用膨胀阀的，但只是作为一种节流装置而已。

3.3 取暖与配气系统

3.3.1 空调取暖系统

汽车空调暖气系统按所使用的热源可分为余热式和独立

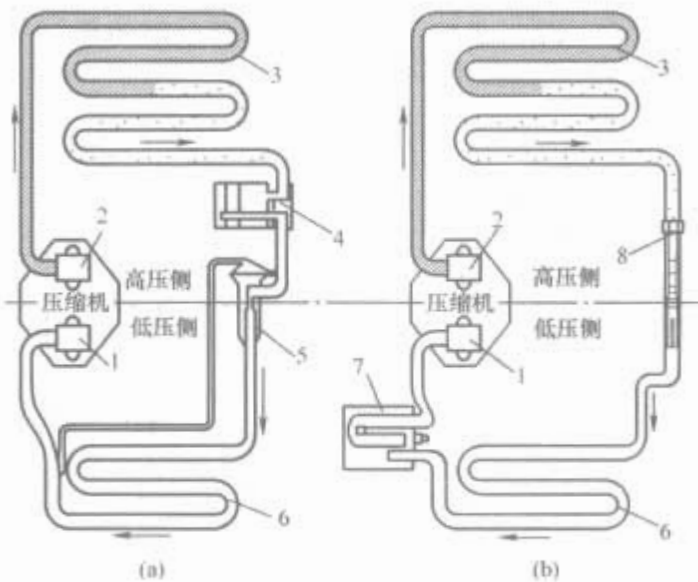


图 1.5-42 汽车空调制冷系统的分类

(a) 膨胀阀系统；(b) 孔管系统

1—低压维修接头；2—高压维修接头；3—冷凝器；
4—储液干燥器；5—膨胀阀；6—蒸发器；7—积累器；
8—孔管

式；按空气循环方式可分为内循环式、外循环式和内外混合循环式；按载热体又可分为水暖式和气暖式。

内循环式是将车内空气作为载热体，使其通过热交换器升温，升温后的空气再送入车内。

外循环式是利用车外新鲜空气作为载热体，使其通过热交换器升温，升温后的空气送入车内供暖。这种外循环方式的空气是最卫生的，但消耗热量也最大。

内外混合式是既利用车室内空气，又引进车外新鲜空气，以混合空气作为载热体、通过热交换器加热，向车内供暖。

3.3.1.1 取暖系统构造

(1) 余热式取暖系统。轿车、货车和中小型客车，需要的热量较少，可以用发动机的余热来直接供暖。余热供暖设备简单，使用安全，运行经济，其缺点是热量较小，受汽车运行工况的影响，发动机停止运行时，就没有暖气提供。余热式暖气系统又分为水暖式和气暖式两种。

1) 水暖式暖气系统。水暖式暖气系统一般以水冷式发动机冷却系统内的冷却液为热源，将冷却液引入车室内的热交换器中，将鼓风机送来的车室内空气或车外空气与热交换器中的冷却液进行热交换，鼓风机再将加热后的空气送入车室内，其结构如图 1.5-43 所示。

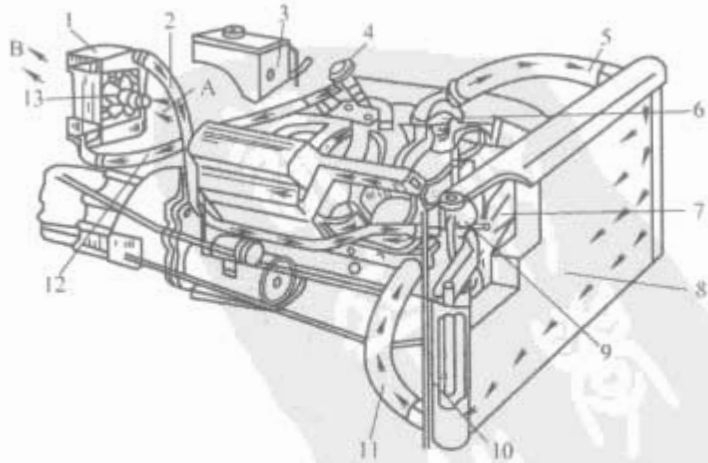


图 1.5-43 水暖式暖气系统

1—加热器心；2—加热器出水管；3—膨胀水管；4—冷却液控制阀；5—散热器进水管；6—恒温器；7—风扇；8—散热器；9—水源；10—散热器溢流管；11—散热器出水管；12—加热器进水管；13—加热器风机；
A—冷空气；B—热空气

2) 气暖式暖气系统。利用发动机排气的余热给车室供暖，其结构组成如图 1.5-44 所示。

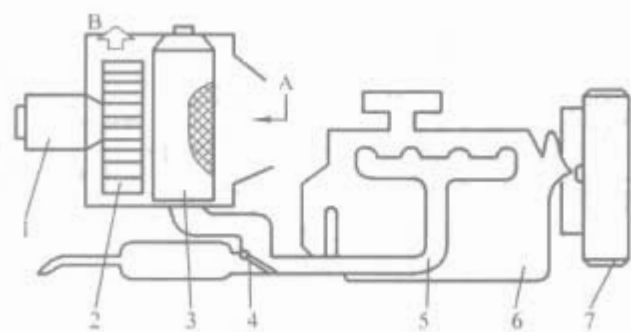


图 1.5-44 气暖式暖气系统
1—鼓风机电动机；2—暖风鼓风机；3—热交换器；4—废气阀门；5—发动机上排气管；6—发动机；7—发动机主散热器；A—冷空气；B—热空气

(2) 独立热源式暖气系统。大型的豪华旅游车、寒带地区使用的客车和轿车，常常采用独立热源式暖气系统。独立热源式暖气系统是在燃烧器里燃烧汽油原油、柴油等燃料，产生的热量加热空气，并将它们输送到车内提高温度，而燃烧的废气则排放到大气中。独立热源暖气系统同样分为独立热源气暖式暖气系统和独立热源水暖式暖气系统两种。

1) 独立热源气暖式暖气系统。独立热源气暖式暖气装置如图 1.5-45 所示，由燃烧室、热交换器、燃料供给系统、空气供应系统和控制系统几部分组成。独立热源气暖式暖气系统的特点是热量大，气暖式高温干热，舒适性差；燃气温度高，安全性差。

2) 独立热源水暖式暖气系统。独立热源水暖式暖气装置的工作原理与气暖式基本相同，其加热制冷剂不是空气而是水，用水泵代替了风扇。水暖式的最大优点是不仅可以作为车厢采暖用，而且可预热发动机、润滑油，以利于冬季起动发动机，待发动机起动后，再将被加热的水通向车厢内的水散热器。水散热器一般是管带式或管片式结构，管子内部流入已加热的热水，而管外则流过待加热的车厢内空气，管外的铝带或铝翅片是为了增加其散热能力。图 1.5-46 所示为独立热源水暖式暖气装置结构，与气暖式的结构相近。

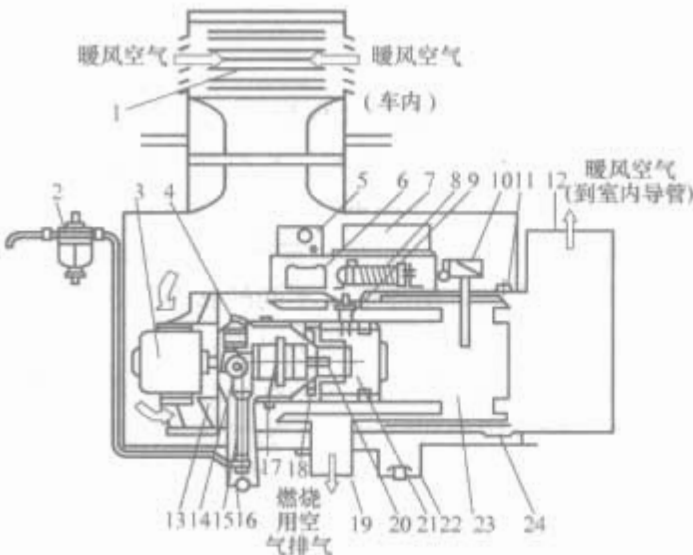


图 1.5-45 独立热源汽暖式暖气装置
1—暖风空气进气口；2—燃油滤清器；3—暖风空气用电动机；4—空气电磁阀；5—开关盒；6—燃烧空气用电机的通风装置；7—继电器；8—加热电阻器；9—加热塞；10—炉内热敏开关；11—温度熔断丝；12—暖风空气出气口；13—暖风空气用鼓风机；14—燃烧电磁阀；15—计量泵；16—燃烧用空气进气管；17—燃烧用电动机；18—燃烧空气用风机；19—排气管；20—旋转喷雾器；21—燃烧室；22—排水装置；23—热交换器；24—双金属开关

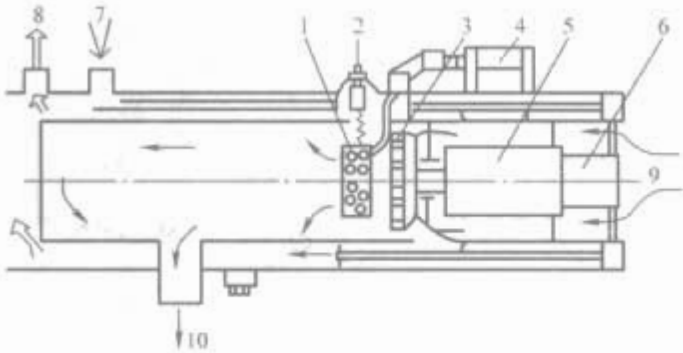


图 1.5-46 独立热源水暖式暖气装置结构
1—多孔陶瓷蒸发器；2—电热塞；3—助燃风扇；4—油泵；5—电动机；6—水泵；7—进水口；8—出水口；9—助燃空气；10—废气

3.3.1.2 取暖系统控制电路

(1) 客车暖气系统电路。大客车的采暖都用独立燃烧式制暖装置，图 1.5-47 所示为 FJ 汽车制暖装置电气原理图和接线图。表 1.5-24 为 FJ 汽车制暖装置电气图符号。大客车独立燃烧式暖气系统控制电路如图 1.5-48 所示。

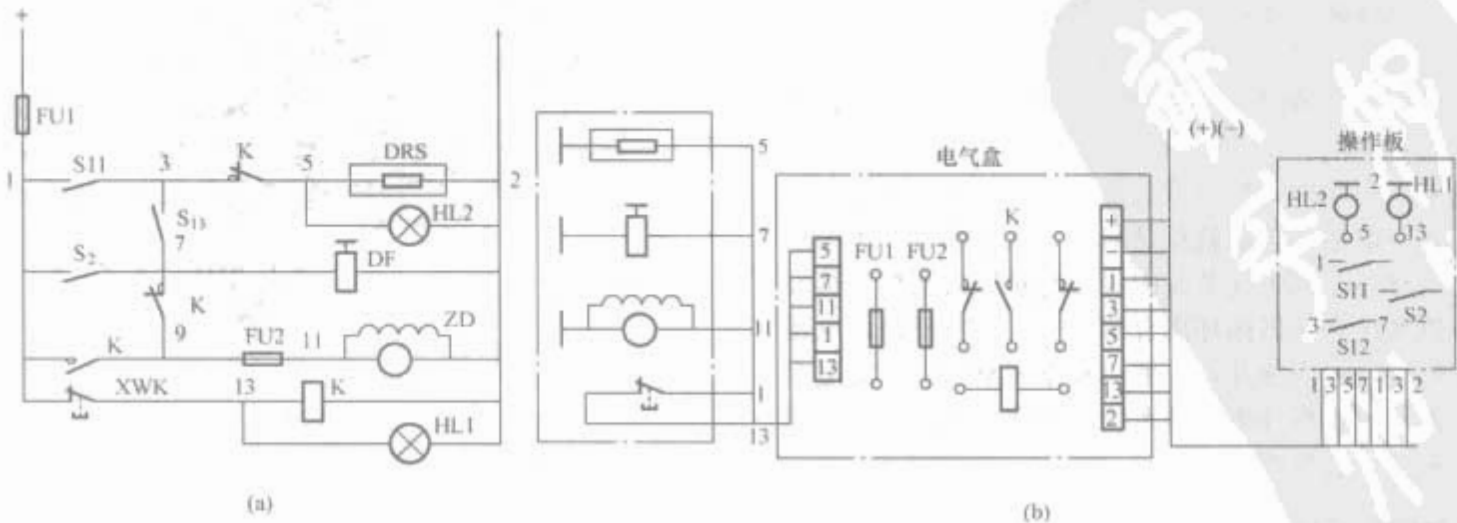


图 1.5-47 FJ 汽车制暖装置电气图
(a) 电气原理图；(b) 接线图

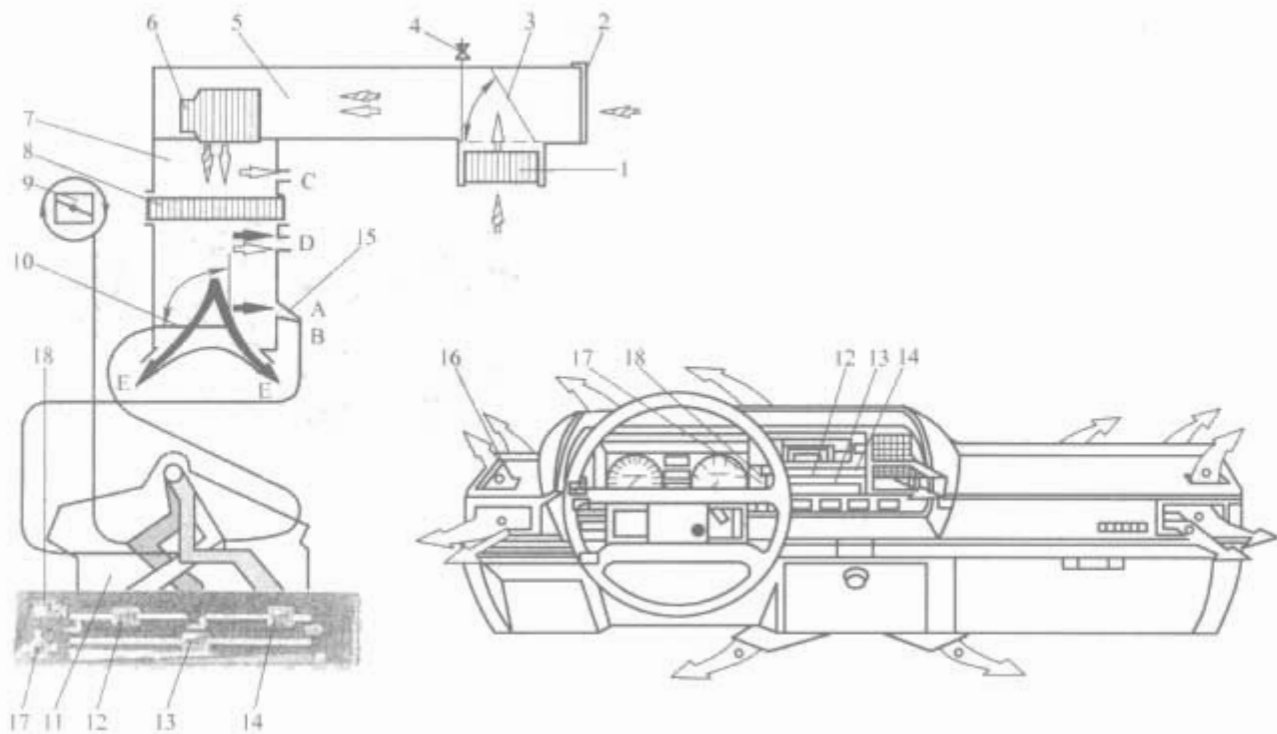


图 1.5-53 空调温度控制系统示意图

1—蒸发器；2—进风罩滤网；3—进风风门；4—真空阀；5—进风罩；6—鼓风机；7—空气分布箱；
8—加热器；9—热水阀；10—足部风门；11—操纵装置；12—足部风门控制键；13—热水阀控制键；
14—除霜风门控制键；15—除霜风门；16—仪表板风口；17—风量旋钮；18—空调开关
↖ 外界新鲜空气；↗ 冷空气；↘ 热空气

表 1.5-25 空调温度控制的内容、目的、方法与执行器

项 目	控制内容及目的	控制方法	执行器与图上标号
外气引入量	通风换气、防止车窗起雾快速制冷与采暖时的内气循环	转换内、外气风门	真空阀控制进风门的开度
送风机速度	控制送风能力、温度分布、送风距离	改变鼓风机电路电阻	这部分图 1.5-53 上未画出
制冷能力、防止结冰	控制制冷循环能力与防止蒸发器结冰	开、关压缩机旁通法固定蒸发压力	这部分图 1.5-53 上未画出
出风口温度	控制出风口温度与车厢内温度	热水流量控制阀再热法空气混合法	调节键，控制进入加热器的冷却水量，同时与加热器前的调温风门联动
调温风门	冷气、暖风出风口的转换、除霜、采暖的转换	转换风门	除调节键的位置外，键 12 的位置控制足部风门 10 的开度；键 14 的位置控制除霜风门 15 的开度

恒温器又称温度开关，是汽车空调系统中控制温度的一种开关元件，用于检测大气温度、车厢内温度及蒸发器表面温度等；检测大气温度和车厢内温度时，一般用于空气混合调节风门的控制，由风门开度的大小调节车厢内的温度。恒温器更多地用于空调系统中控制电磁离合器的通断。此时，恒温器被放置在蒸发箱内或靠近蒸发器的冷气控制板上。当蒸发器表面温度或车厢内温度低于设置温度时，恒温器断开，电磁离合器分离，压缩机停止工作；反之电磁离合器吸合，压缩机开始工作，由此而防止蒸发器表面结霜，同时也调节了车厢内的温度。

恒温控制器分为机械式和电子式。

机械式温控器工作原理：利用感温包探测的温度使感温剂产生相应压力推动温控器触点动作，控制电路的通断，通过循环反复上述调节过程，从而防止蒸发器结霜，维持制冷系统的正常运行。图 1.5-54 所示为一种典型的恒温器构造，图中触点处于断开位置，压缩机也处于停止状态。当蒸发器表面温度逐渐升高时，感温包内温度也随着升高，同时压力增大使波纹管伸长，波纹管与摆动框架相连，框架上装有一动触点，而恒温器壳体上有一定触点。波纹管的伸长使得触点闭合，电磁离合器电路被接通，使压缩机工作。反之，温度下降后压缩机停止工作。一般温控器在大于 2~5℃，通；小于（-1~0）℃，断。

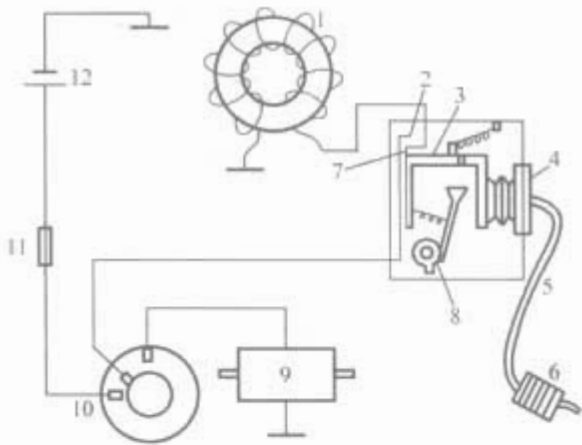


图 1.5-54 波纹管式恒温器

1—电磁离合器线圈；2—触点；3—摆动框架；4—波纹管；5—毛细管；6—感温包；
7—绝缘块；8—冷点调节；9—风机电动机；
10—开关；11—熔丝；12—电源

电子温控器感温、控制原理：这种温控器的感温元件是热敏电阻，装在蒸发器的外侧正面或其他需要感温的部位，用以检测蒸发器的出风温度。热敏电阻用导线与晶体管电子线路相连，由于温度变化使热敏电阻的电阻值发生变化，从而控制电路的接通或断开。

电子式温控器一般采用负温度系数的热敏电阻，即温度

升高，电阻值下降；温度降低，阻值上升。热敏电阻将温度变化转换成电阻变化，即转换成电压变化。当热敏电阻的电压变化信号被放大，便可带动控制电磁离合器的继电器动作，达到对车室内温度控制的目的。车室内温度高低的调整是靠调温电阻来调节的。

3.4.2 发动机的怠速控制

汽车空调设备的压缩机是由发动机通过电磁离合器来驱动的。如果在发动机怠速时，使用空调设备，会使发动机负荷增大，造成发动机熄火或过热。因此，必须提高发动机的怠速转速。怠速自动调整装置，能提高发动机的怠速转速。如丰田 COASTER 牌、HIACE 牌、CORNA 牌等车型都普遍使用怠速自动调整装置。

怠速时开启空调会引起的问题：发动机熄火、发动机散热差、车上电量严重不足、制冷系统冷凝效果不好。

(1) 怠速继电器。怠速继电器可设定怠速转速：低于设定值，自动断开压缩机离合器。可设置工作模式（A/M）。电路原理图如图 1.5-55 所示，接线图如图 1.5-56 所示。

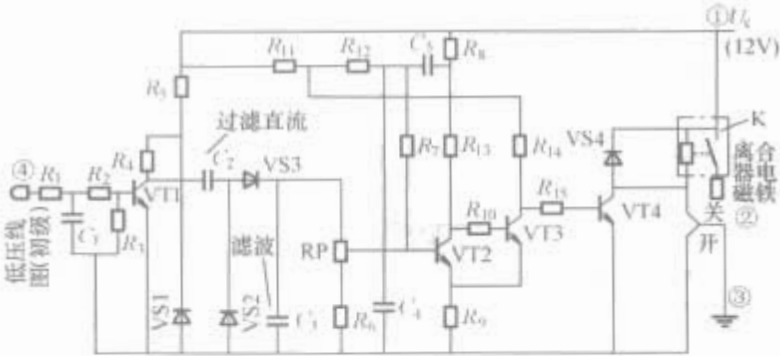


图 1.5-55 怠速继电器电路原理图

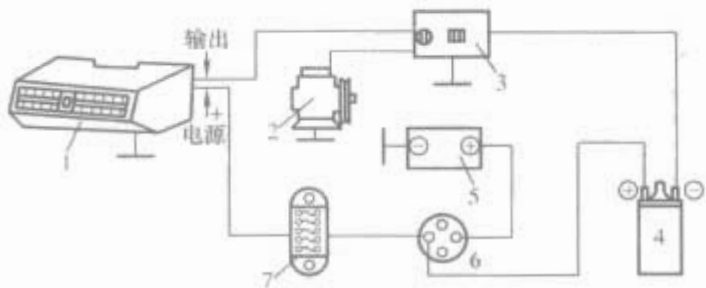


图 1.5-56 怠速继电器电路接线图

1—蒸发器；2—压缩机；3—怠速继电器；4—点火线圈；5—蓄电池；6—点火开关；7—熔断器

注：电喷车用发动机芯片完成怠速的控制，也有部分车将温控器与怠速继电器做成一体。

(2) 怠速提升装置。怠速提升装置的作用：接通压缩机离合器，自动提高发动机怠速转速；断开压缩机离合器，自动恢复原怠速转速。

怠速提升装置的三种形式：①节气门直接驱动怠速提升装置。主要用于化油器发动机，控制元件有 VSV 阀、真空马达（真空驱动器）。②旁通空气道式怠速提升装置。用于 EFI 发动机，提高怠速部分增加的进气量从旁通阀进入，而非节气门旁通阀的控制可以是电动控制，也可真空控制。③发动机怠速马达控制式。利用电脑来检测压缩机的工作情况。图 1.5-57 所示的是节气门控制式怠速自动调整机构。

1) 主要部件。①膜片缸。膜片缸结构如图 1.5-58 所示，膜片缸上腔 2 和节气门后面以气道相通，膜片 4 下面连着一根推杆 5，推杆 5 下端和操纵臂相连。膜片上面有一根弹簧 3，它的力量总要使膜片向下运动，并通过推杆、操纵

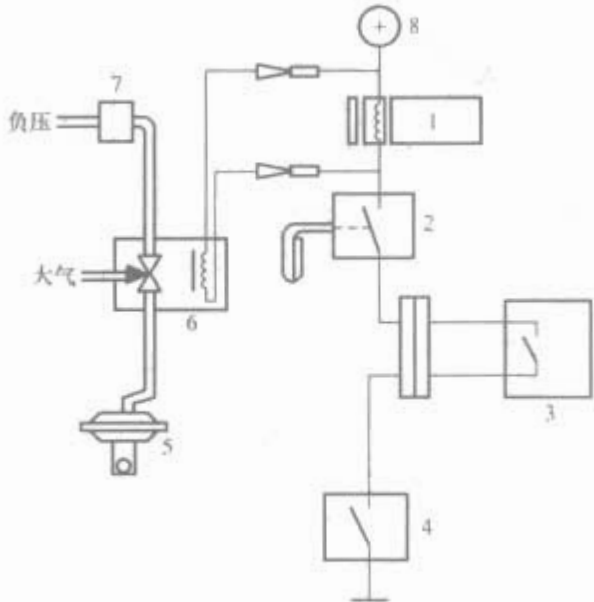


图 1.5-57 怠速自动调整装置

1—压缩机；2—恒温器；3—空调开关；4—鼓风机开关；5—膜片缸；6—控制真空通路电磁阀；7—节气门后真空度；8—蓄电池正极

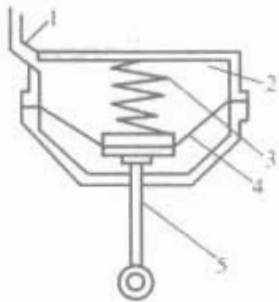


图 1.5-58 膜片缸

1—膜片；2—膜片缸上腔；3—弹簧；4—膜片；5—推杆

臂把节气门开大。②控制真空通路的电磁阀。该阀的结构如图 1.5-59 所示，在不通电时，A 孔和 B 孔相通，进气歧管的真空度传到膜片缸上腔内，通电时，A 孔通大气，而将大气引入膜片缸上腔。

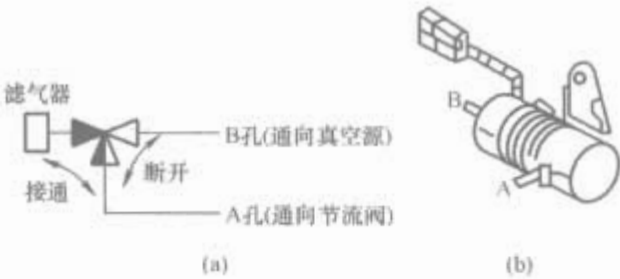


图 1.5-59 控制真空通路的电磁阀
(a) 原理图；(b) 结构图

2) 怠速调整机构的工作过程。①不使用空调设备时，如图 1.5-60 所示，空调开关断开，控制真空通路的电磁阀 1 的线圈不通电，电磁阀 1 开启，进气歧管的真空度传到膜片缸的上腔 4，克服弹簧 5 的压力，把膜片 6 移向上方，于是操纵臂 7 与摇臂 8 脱离，节气门 9 保持原怠速开度。②使用空调设备时，如图 1.5-61 所示，闭合空调开关 2，电磁阀 1 的线圈通电，将真空通路关闭，而将大气通路开启，膜片 6 在弹簧力作用下向下移动，通过操纵臂 7 压下摇臂 8，使节气门 9 开度加大，怠速转速上升，以适应发动机驱动空调设备的需要。

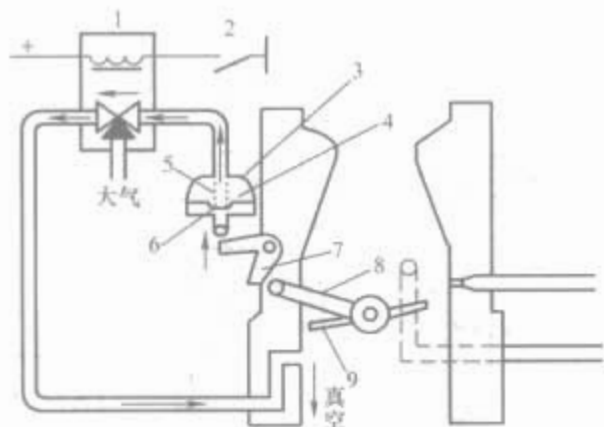


图 1.5-60 断开空调开关时
1—电磁阀；2—空调开关；3—膜片缸；4—膜片缸上腔；5—弹簧；6—膜片；7—操纵臂；8—摇臂；9—节气门

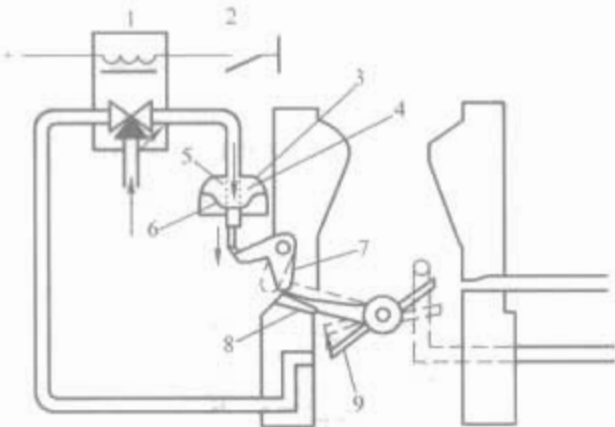


图 1.5-61 闭合空调开关时
1—电磁阀；2—空调开关；3—膜片缸；4—膜片缸上腔；5—弹簧；6—膜片；7—操纵臂；8—摇臂；9—节气门

3.4.3 系统的真空控制

3.4.3.1 真空系统的执行元件

多数轿车空调系统采用真空装置作为控制元件，控制某些风门或阀门的开闭。这是由于一方面汽车上有现成的真空来源，更主要的是真空控制装置结构简单、经济。

(1) 真空罐。真空系统的真空源来源于发动机的进气歧管，进气歧管的真空度随发动机运行工况的不同而改变。发动机怠速时，进气歧管真空度最大；发动机在大负荷或满负荷时，进气歧管真空度最小。真空度在 33.7~101kPa 之间。由于真空度的变化会直接影响真空系统的工作，所以设立一个真空罐，其作用是向真空系统提供稳定的真空压力，另外还可以储存真空，使真空系统在发动机停转时，仍能保持一定的真空度。真空罐是由一个金属罐构成，内部装有一个单向阀，用来保持管内的真空度。

(2) 真空驱动器。真空驱动器的作用是根据真空度的变化进行机械动作，以控制风门和热水阀。汽车空调系统中常采用的真空驱动器有单膜片式真空驱动器和双膜片式真空驱动器两种，其内部分别如图 1.5-62 和图 1.5-63 所示。

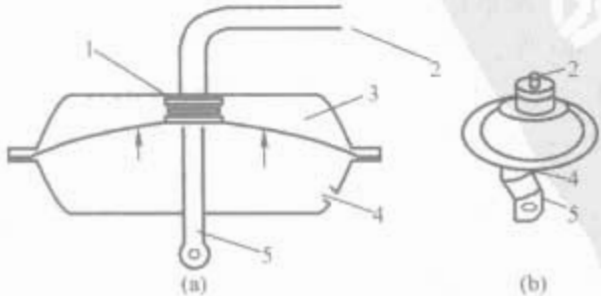


图 1.5-62 单膜片式真空驱动器
(a) 内部结构；(b) 外形
1—复位弹簧；2—真空接口；3—膜片；4—通气孔；5—连杆

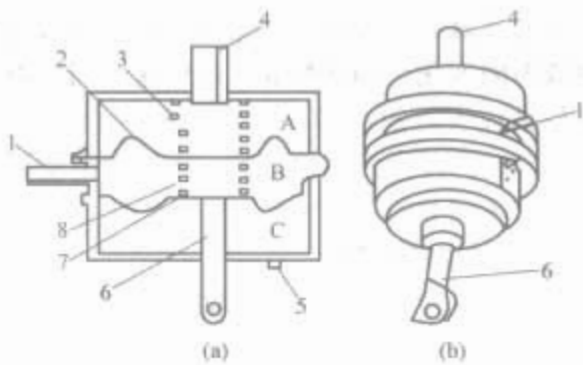


图 1.5-63 双膜片式真空驱动器
(a) 内部结构；(b) 外形
1—B 室真空接口；2—A 室膜片；3—A 室弹簧；4—A 室真空接口；5—通气孔；6—连杆；7—B 室膜片；8—B 室弹簧

3.4.3.2 真空控制系统

图 1.5-64 所示为汽车空调真空控制系统的一个例子。在该系统中，各风道由风门控制，风门由空调方式选择开关操纵真空开关通过真空驱动器来控制。除控制除霜风门的真空驱动器采用双膜片式以外，控制其他风门的真空驱动器均采用单膜片式。

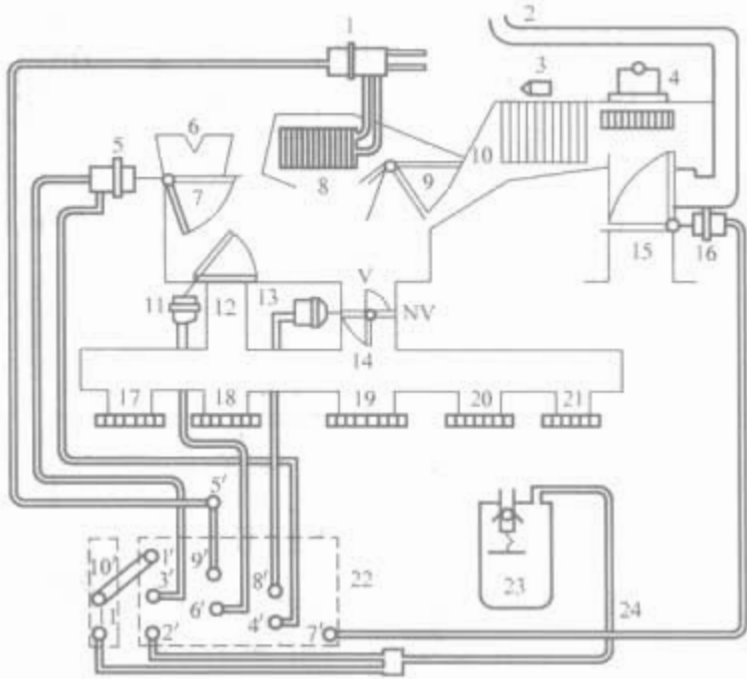


图 1.5-64 汽车空调真空控制系统例子
NV—真空驱动器不通真空风门位置；
V—真空驱动器真空风门位置

1—热水阀；2—外界通风口；3—温包；4—鼓风机；5、11、13、16—真空驱动器；6—除霜风口；7—除霜风门；8—加热器；9—温度门；10—蒸发器；12—地板风门；14—仪表板风门；15—循环风门；17—左可调风门；18—左下可调风口；19—左中可调风口；20—右中可调风口；21—右可调风口；22—控制开关；23—真空罐；24—真空管路

3.5 自动空调系统

自动空调系统采用一般空调系统的基础部件。主要差别在于自动空调系统能保持预先设置的舒适程度，如同驾驶员选择的那样。它利用传感器确定当前的温度，然后系统能够按需要调节暖风或冷风。系统用执行机构开、闭气流混合门以达到适宜的车内温度。有些系统还控制鼓风电动机的转速，使湿度更符合驾驶员的要求。

自动空调系统分两类：半自动空调系统和全自动空调系统，两者的主要差别在于是否有自诊断功能。半自动空调系

统没有提供故障码存储器，全自动空调系统具有监控系统，监控系统的随机存取存储器（RAM）存储诊断码。其次的差别是所用的执行机构型式和传感器数量。虽然两类系统的工作方式有所不同，但它们都设计成按预先设置的舒适程度控制车内的温度与湿度，车内保持的温度与湿度与车外的气候条件无关。车内的湿度保持在45%~55%。自动空调结构原理框图如图1.5-65所示。

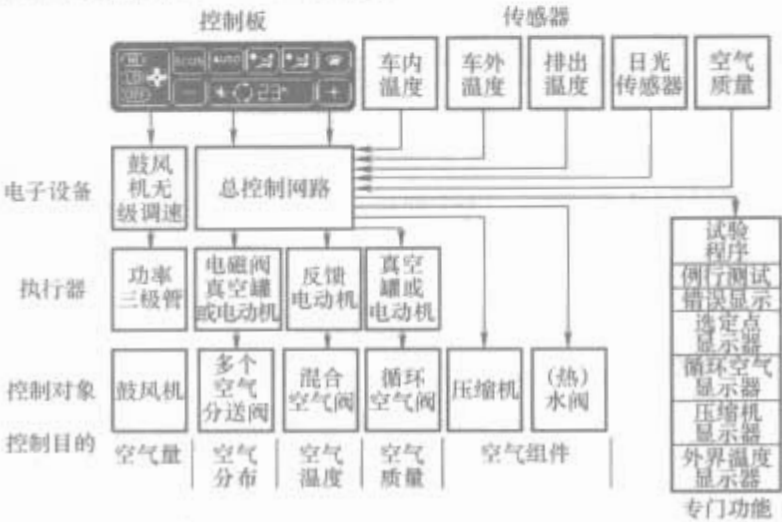


图 1.5-65 自动空调结构原理框图

HI—高；LO—低；OFF—停；ECON—经济；AUTO—自动

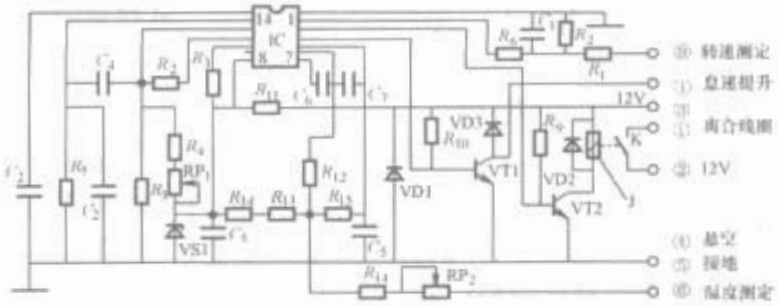
3.5.1 半自动空调系统

半自动空调系统与手动空调系统的差别不大，其主要不同之处在于半自动空调系统采用程序装置、伺服电动机或控制模块等操纵执行机构。半自动空调系统通过程序装置检测空气温度和气流混合风门位置来达到驾驶员选择的舒适程度。驾驶员手动操作控制器总成上的键，选择空调系统的工作模式和鼓风机转速。

半自动系统是真空控制系统和放大器控制系统的组合系统。

真空控制系统由真空罐、真空选择器、真空换能器和真空驱动器构成。

放大器控制系统将温控器与怠速控制装置合为一体，使功能更强大，控制精度更高。多功能空调放大器除了具有温控功能、怠速控制功能外，还有车内外温度探测、冷媒压力探测（并利用这些参数来控制制冷系统、送风系统、速度控制）等功能。放大器控制系统包括发动机转速检测电路、温度检测电器、放大驱动电路。原理图如图1.5-66所示。



(2) 自动控制。在“**AUTO**”工作状态,鼓风机转速根据 T_d 值控制。

3.5.2.3 风扇与空调控制

散热器风扇有两个,风扇的转速也有两个,由发动机电控单元通过低速继电器、高速继电器和串/并联继电器控制风扇的运转,风扇的高、低转速不是由调速电阻控制的。

3.5.3 车身计算机模块控制的空调系统

自 1986 年在 GM 汽车公司生产的汽车上广泛使用车身计算机模块(BMC)控制方法。该系统具有几个模块,使用了多路系统共享信息。BCM 对全自动空调系统实现中央控制。BCM 监控所有系统传感器和开关,得到的数据与程序指令作比较,然后命令执行机构对系统作精确控制。

3.5.3.1 系统部件

气候控制板(CCP)装有一块电路板,它将驾驶员的输入变换为电信号。CCP 与 BCM 通过数据电路相互通信。送至 CCP 的信息可由真空荧光显示器显示出来,如图 1.5-68 所示。



图 1.5-68 气候控制板

BCM 通过几个传感器监控空调系统,高压管路上的温度传感器监测制冷剂高压侧温度,根据 R-12 或 R-13a 制冷剂的压力和温度的关系,BCM 能将监测得的制冷剂高压侧温度换算为压力,由制冷剂低压侧温度传感器监测的温度,BCM 以相同方法换算为压力。BCM 还得到来自蓄压罐的压力开关信号。如果空调系统不在设定的参数范围内工作,BCM 便将冷气压压缩机离合器分离。

程序装置用一个双向电动机调节混合风门的开度。程序装置有 5 个操纵真空到各个模式风门和暖风加热器供水阀的电磁阀。所有调节和操纵均通过 BCM。

功率模块控制鼓风电动机。功率模块得到来自 BCM 的鼓风机驱动信号,将信号放大到能驱动鼓风电动机按预定转速旋转。

3.5.3.2 工作原理

车身计算机模块根据控制器总成(驾驶员输入)、外界温度和车内温度传感器的输入,计算出一个代表驾驶员需要得到的暖气与冷气数量的程序号。根据此程序号确定气流分送模式、鼓风机转速、混合风门开度。

为了使进入乘员舱的气流温度恰当地混合,BCM 监测外界和车内温度、制冷剂低压管路平均温度、发动机冷却液温度。这些输入与程序号组合,BCM 命令程序装置把气流混合门放到适当位置,以此修正进入空气的温度。程序装置反馈电位计也受 BCM 监测。

鼓风机转速由程序号和驾驶员输入需要的温度值的组合而定。

程序装置中的 5 个电磁阀分别操纵由机械和真空控制的风门。进风门、朝上/朝下出风门和空调器除霜风门是个别控制的。从 BCM 送至程序装置的命令,控制电磁阀动作。

冷气压压缩机离合器的控制是由发动机控制模块(ECM)按照 BCM 的输入来执行的。ECM 根据制冷剂高压侧和低压

侧温度传感器送到 BCM 的输入信号,控制压缩机离合器的离合。此外,ECM 预测离合器的周期性变化,据此适当地调节发动机的怠速。

BCM 监测系统的输入和反馈信号,如果这些电压信号与程序参数不一致,BCM 便点亮“维修空调”指示灯。程序号为 0,代表冷气最大,100 代表暖气最大。当在诊断模式时能观察到程序号。

驾驶人员在面板上输入控制要求后,车身模块依据“厢内温度”、“外界温度”和“日光照射量”的输入参数,对自动空调系统进行控制。通过 5 个电磁阀和 5 个真空执行机构分别控制进风口阀门、加热器供水阀门、朝上/朝下出风门及除霜风门的开启度,以达到自动空调的目的。

4 汽车音响

4.1 概述

现代汽车的音响已经成为汽车必不可少的装置,它既是音响领域中的一员,同时又是汽车的一种基本装置。汽车音响已从最早的单 AM(调幅)收音机,发展到现在具有 AM/FM(调幅/调频立体声)、SW(短波)收音、自动返磁带放音、单碟/多碟 CD 放音、MD 放音、DTA 数码音响、DSP(数码信号处理器)、电子分音器、电视接收系统、VCD 影视系统等,形成了多功能、数字比、逻辑化、多性能、高指标、大功率输出立体声系统。

4.1.1 采用的新技术

随着电子技术的发展,在有限的汽车空间内装置现代音响,浓缩了大量的高新技术,不但使音质大大提高,而且可靠性也大大提高。新型汽车音响的音响效果好、噪声低、抗干扰性能稳定、操作方便。新型的汽车音响采用的新技术主要有:

(1) 数字调谐技术。数字调谐技术是汽车音响向数字化方向发展的重要标志。用数字调谐技术的调谐器,可使收音调谐自动扫描搜索、自动搜索存储。能预置十几个节目,调谐器还具有 FM“高保真”方式的特性,调谐器有数十个预设,不但有自动储存寻找节目的功能。还有人工调谐、寻找、检索和预检索的功能。一般利用 4 位数字专用处理器来实现调谐自动搜索,每当搜索到一个电台时,自动停留约 7.5s,并自动存储在存储器内,一般可存储 12~24 个台,如要调用,只要按动相应的数字键即可。

(2) 实现对磁带机芯的逻辑控制。采用逻辑电控机芯可使磁带放音机芯实现微机控制自动化。实现选曲、快进、倒带、暂停、退带的逻辑控制或自动控制。逻辑电控机芯有单电动机、双电动机和多电动机 3 种类型,单电动机则较为普遍。操作这种逻辑电控机芯的汽车音响,可方便地实现音乐搜索,每个音乐节目取样放音约 8s,总需选用,再按下“MS”键即对;还有电脑选曲、自动翻转、双向走带、断电自动退带等功能。

(3) 一般都采用大功率功放输出。大多汽车音响的功放已达 30~100W 的功率,并使失真度小,音质佳。

(4) 采用多片连续播放式 CD 机。采用多片连续播放式 CD 机,可克服单 CD 机和 CD 收音机换片的缺点,使具有 CD 控制操作功能和 TAPE/FM/AM 收放机功能,可 6~12 片 CD 碟连放和选碟。这样既有磁带放音,又有 CD 音源。

(5) 新型的数/模转换器和数字滤波技术。采用独立的左、右声道数/模转换器,使左、右两声道的数字信号同时转换处理,可消除时间的不一致性,使音质更佳。

(6) 新颖的消噪系统。有些汽车音响采用 MASH 多值噪声消除系统, 将一阶段或二阶段消噪器级联起来。第一级的量化误差在第二级中再次被量化, 以衰减包含于原级输出信号中的量化误差。可使低频带量化噪声被衰减到很低的水平。还有的音响采用独特的降噪线路, 有效地隔离了地线的噪声; 有的则采用先进的脉宽调制式直流变换器, 可消除汽车电器系统的噪声杂音, 使信噪比大大提高。

(7) 语音识别系统。汽车音响的高档化、功能的复杂化, 使汽车音响的开关繁多, 在驾驶员操作时易分散其注意力, 形成不安全因素。汽车音响采用语音识别技术代替手动的键钮操作, 不仅使操作简便快捷, 行车的安全性也提高了。汽车音响的语音识别系统是靠语音识别模块, 即语音频率分析集成电路实现的。语音识别系统一般可以选择接收频道, 控制磁带的进、退, 控制磁带盒的进、出, 控制激光唱机的播放、选曲等, 可达 20 多条指令。

(8) 模糊逻辑原理在汽车音响上的应用。汽车音响除了在重放时力求做到尽善尽美, 在操作上简便易行, 并且大量采用计算机技术、人机工程学、听觉心理学知识等, 使繁杂的操作只有人工智能。模糊逻辑原理的应用在汽车音响的操作控制上是很有必要的。例如, 有的汽车音响具有环境噪声补偿系统, 它可以量度轮胎、路面和发动机噪声, 然后与用户设定的音调音量做出比较后, 自动调节音调音量至适当的水平, 从而省却了不断调校的麻烦。

4.1.2 音响对设备的要求

由于汽车音响使用环境较差, 所以汽车音响设备应符合以下特殊要求:

(1) 应使用直流电源。一般的音响和电视机都使用交流电源, 便携式音响使用干电池, 而汽车视听装置的电源是用汽车上 12V (或 24V) 蓄电池, 因此必须使用直流电。最常用的是用负极接地的 12V 蓄电池供电。

(2) 抗干扰性能要强。为防止汽车本身产生的电磁干扰, 汽车音响必须采用抗干扰性能强的电路和元器件。一般汽车音响的电源都有电源扼流圈, 外壳必须采用全密封的接地铁壳进行隔离。

(3) 抗振性能要好。汽车在各种不同的路面上行驶, 对汽车视听装置的振动很大, 要求元器件焊接装配要牢固, 引脚尽量折弯焊接。

(4) 天线应采用外置式。为了减小汽车发动机对收音机的干扰, 天线一般采用机外拉杆天线。当天线损坏时, 收音部分收不到电台广播。

(5) 应有防尘措施。汽车行驶时, 尘埃很多, 故视听装置需进行必要的封装, 防止或减少尘埃的影响。

(6) 要选用耐热元件。由于汽车内温度较高, 视听装置难于散热, 因此选择的元器件耐热性能要好, 工作要稳定, 焊锡温度不能过低。

(7) 接收灵敏度要高。汽车驾驶室有屏蔽作用, 加上汽车飞速行驶, 有时离发射台很远, 故要求 AM 广播的接收灵敏度要小于 $50\mu\text{V}$, FM 大于 $3\mu\text{V}$, AM 的 AGC 范围要求大于 40dB, 能承受 1000mV 大信号输入不产生阻塞失真。

(8) 采用电感式调谐。为了防止汽车在行驶中振动对调谐的影响, 汽车收放机应采用电感式调谐, 即在一塑料骨架上缠一定匝数的线圈, 在滑块上固定若干磁芯, 用调谐杆推动磁芯在固定通道内旋进旋出, 从而改变电感量大小, 达到调谐目的。当磁芯位置全部旋入通道时, 电感量最大, 此时调谐的电台频率为最低端。反之, 当磁芯全部旋出通道时,

电感量最小, 此时调谐频率为最高端。

(9) 采用低阻抗大功率扬声器。为了获得较大的功率, 除了功放级采用 BTC 方式外, 扬声器采用 $1.6\sim 4\Omega$ 的低阻抗大功率扬声器, 并用很粗的扬声器引线。扬声器口径多为 10~15cm。高级汽车音响采用同轴 2 分频或 3 分频的 15~20cm 扬声器。

(10) 具有夜光照明功能。汽车在夜间行驶时, 为了收音和放音的方便, 按键应设有透光的照明。设计这种照明装置时, 不能影响 LCD 数字显示效果。

(11) 体积要求较小。由于汽车受到内部空间的限制, 视听装置的体积应尽量设计的小些, 因此选择的各种机械配件和电子元器件, 都应该体积小、散热好。

(12) 采用现代新技术。针对汽车音响使用环境差的特点, 现代汽车音响系统中采取了一些最新技术加以弥补: ①BBE 相位补偿技术, 主要作用是减小信号失真, 提升中、高频音质, 使声音更自然地还原; ②DSP 数字声场处理器, 通过数字信号处理对声场进行模拟, 如模拟礼堂、体育场、教堂、舞厅等声场, 以克服汽车车内声场的压迫感; ③LPS 听音位置选择功能, 通过内部对前、后、左、右声道信号的处理, 将声场定位在车内的不同位置, 以克服车内声场的不对称性; ④DHE 数字泛音增强技术, 作用是提高低音, 使低音更加雄厚 (主要作用于 MD)。

4.1.3 与家用音响的区别

从结构上讲, 汽车音响与家用音响, 无太大差别, 都是由主机、功放、扬声器及相关附件构成。但就设备性能而言, 二者有着很多不同之处, 主要表现在以下几个方面。

4.1.3.1 外形体积受到限制

汽车控制台上为音响设计的安装空间较小, 按 DIN 标准规定为 $183\text{mm}\times 50\text{mm}\times 153\text{mm}$ 。在这有限的安装空间中, 汽车音响一般只能使用高密度贴装元件, 采用多层立体装配结构形式。相比之下, 家用音响的体积则不受此限制。

4.1.3.2 使用环境恶劣

汽车音响的使用环境较家用音响要差得多, 主要表现在: ①汽车音响的安装部位距发动机较近, 故经常在温度较高的条件下 (最高达 $70\sim 80^\circ\text{C}$) 工作, 同时汽车音响还要承受室外温度的变化; ②汽车在不同等级的路面上行驶, 致使汽车音响经常受到振动和冲击; ③在冬季或阴雨天气, 车厢内湿度较大。针对使用环境特点, 汽车音响应采取以下措施: ①采用高等级, 性能可靠的元器件; ②元器件焊接装配要绝对牢固, 个别的元器件要用强力胶固定; ③汽车磁带放音部分多采用横向放置方式, 上下卡紧保证稳定放音; ④CD 部分使用多级减振措施 (拉簧、气囊, 利用气囊的阻尼特性、先进电子防振系统), 就是将 CD 所放的信息提前 3s 存入芯片, 当 CD 机受到强烈振动时, 激光头要进行保护停止工作, 这时芯片存储的信息放出, 所以感觉不到放音有停顿现象; ⑤采取防潮措施, 在元器件表面喷涂防潮剂保护线路。

4.1.3.3 匣式机芯

普通国产 (组装) 的中、低档汽车收放机一般采用单向走带插入式机芯, 单轮驱动方式, 少数机器采用自动回转机芯。机芯位于机器的正中, 固定在机壳的盘底上, 磁带入口处装有挡片起防尘作用。带电源开关的音量电位器及音调电位器一般装在机芯左边, 采用同轴异步结构, 以缩小所占空间。调谐钮及平衡电位器一般装在机芯右边, 也采用上述结构。机芯上方位调谐度盘, 内装有度盘照明灯、调频立体声指示灯及走带指示灯, 面板上有出带/快进按键、FM/AM

转换按键。少数机器还装有静噪按键。调谐指示为拉线指针式。

匣式机芯的结构如图 1.5-69 所示。这种机芯元件少,结构简单,除有一个录放磁头外,不专设抹音磁头。因此,它只能作放音之用。另外还不设置供带盘座,只设置一个收带盘座,所以在快速进带时,应将放音操作键按至中间位置(不到底),才能快速进带。若需倒带,则应将磁带盒翻转插回放音座内,把放音键接到快进位置,然后实现倒带。此种机芯虽然简单,但因为功能不完善,故一般录音机中很少采用,主要用于汽车上的收音机。

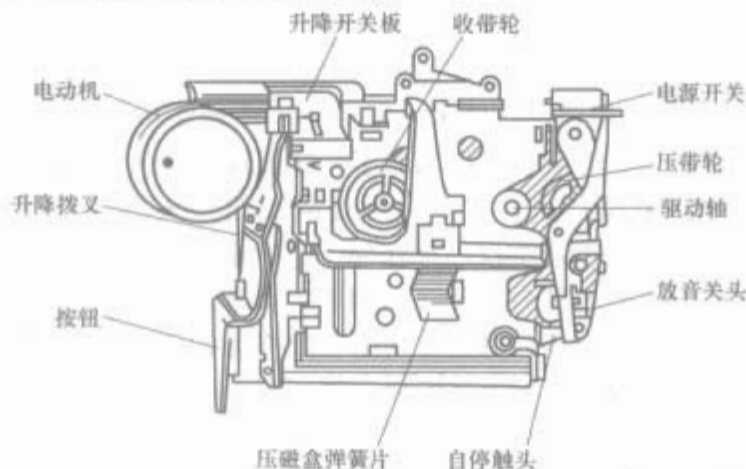


图 1.5-69 匣式机芯的结构

4.1.3.4 电源要求苛刻

汽车音响一般均为负极搭铁方式,采用 12V (或 24V) 直流供电,电压变化将直接影响音响的输出功率,这就要求供电用线的材质阻抗非常小。其中,蓄电池装头采用合金表面镀金材料制造,使导电性能加强。主机输出方面采用 BTL 工作方式,可获得 $4 \times 40W$ 的功率;使用低阻抗的扬声器 (212~491 特制规格) 以获得更大的功率。在功率放大方面采用开关电源升压方法,将电源电压升至 35~40V。这样在电压波动时,可保证输出功率的稳定。由此就要求汽车音响的功放具有大电流线性好、饱和压降小、效率高,并且具有过热、过电流、短路等保护措施。

4.1.3.5 抗干扰能力强

在汽车电器中,汽车发动机的点火装置以及各种用电器一般都共用一个汽车蓄电池,这就会因为电源电流变化对汽车音响造成干扰,气缸高压点火也会通过空间磁场变化对 AM/FM 接收进行干扰。因此汽车音响中都装有一个用以滤除上述干扰的扼流圈元件,针对电源电压波动干扰进行滤波,磁场干扰则一般采用全密封的冷轧铁皮壳进行隔离,高级汽车音响则装有专用抗干扰的集成电路。

4.1.3.6 收音部分灵敏度高,动态范围大

无论是传统汽车音响,还是采用数字调谐技术的音响,汽车音响对 AM/FM 波段的接收灵敏度都要高于家用音响。一般对 AM 波段的接收灵敏度要求小于 $50\mu V$, FM 波段的接收灵敏度小于 $3\mu V$ 。这样,才能使汽车在高速公路上飞速行驶或是穿行于高楼桥梁时,捕捉信号稳定可靠,保证正常收听。

4.1.3.7 配件品质要求较高

与汽车音响相配套的扬声器由于受安装空间的限制,一般不能选得很大,前置扬声器口径一般在 4~6in (1in=25.4mm) 之间,后置扬声器一般为 12 或 14in,最大的也不超过 18in。这就要求扬声器具有较高的品质,以达到理想的音质效果。扬声器的引线一般采用镀银 (镍) 铜排,以降低接触电阻,减少线损。

此外,汽车音响还有许多家用音响所不具备的功能。

4.1.3.8 汽车音响的防盗

某些汽车音响有防盗功能,其类型有两种:①在被监时汽车音响的主要部分变为不可拆卸或强行拆下即损坏,通常利用电磁铁及其他机械锁定装置;②设定密码,当驾驶员设定密码并进入防盗状态后,音响系统必须输入驾驶员设定的密码,否则不能工作。音响系统可较容易地拆下,但密码不正确时,音响系统不工作。

防盗系统的标志在录音磁带槽盖上刻有英文 ANTI-THEFT SYSTEM,即防盗系统。

(1) 防盗系统的设定条件。关闭所有车门,关闭发动机罩盖和行李箱门,从点火开关锁芯中拔出点火钥匙。

(2) 防盗系统的设定工作。当按下规定的按钮,输入密码特征 (ID) 数字后,防盗系统即开始运行音响系统在出厂时,密码 ID 数字尚未输入,防盗系统不工作。部分车辆的音响防盗系统的密码特征采用六位数字,其中三位是由生产厂家确定,另外三位由驾驶员确定。生产厂家确定的三位数字不可改变,若输入错误,音响系统不能工作。

(3) 防盗系统的工作。当系统电源被切断后,即使再接通电源,音响系统也不会再工作。当输入密码错误时,音响系统不工作,且处于休眠状态,即便再输入正确的密码,音响系统也不工作。休眠的时间可能是几天或几十天。

(4) 防盗系统防盗状态的解除。当电源被切断再接通后,用户输入设定的 ID 数字,防盗系统的防盗状态即被解除,音响系统便能正常工作。

4.2 基本组成

4.2.1 概述

汽车音响作为音响领域中的一员,随着半导体技术、音响再生技术的发展,家庭音响的普及而不断发展起来。早在 1925 年,汽车上就已装设 AM (调幅) 收音机,后来是 AM/FM (调幅/调频) 收音机、磁带放音机,发展至 CD 放音机兼容 DCC、DAT 数码音响。汽车音响是与室内音响有很大区别的新颖音响。从技术上看,汽车音响比室内音响有着以下一系列困难之处:

(1) 在无线电接收发送过程中,电波强度由于受到地形、地点、时间、气候等多种因素影响发生不稳定的变化。

(2) 汽车音响空间过分狭小,车窗玻璃和内饰件形成音响的无序环境,乘员相对于喇叭位置不均衡等,存在着很多制约条件。

(3) 无线电接收灵敏度越高,音响特性的真实度越要提高,汽车的电子电器装置所发出的电噪声也越容易接受。

(4) 由于受热辐射影响,盒式磁带伸长,以及振动冲击等原因,引起光盘走音失真,为此要特别开发适用于汽车音响的机械装置。

4.2.2 音响系统的构成

图 1.5-70 所示为汽车音响系统的框图,包括天线装置、音源部分、音频处理电路、功率放大器及扬声器系统等五个部分。

4.2.2.1 天线装置

天线的作用是接收广播电台的发射电波,并通过高频电缆向无线电调频装置传送。汽车天线可分为 AM 天线和 FM 天线两大类,同时汽车天线有多种外形,以配合不同车型的需要。常见的天线形式有安装在驾驶室外车身外板上伸出金属棒的柱式天线,以及在后挡风玻璃内埋装的玻璃天线,还有随接收 AM 或 FM 不同频段的自动伸缩不同高度的拉杆天线。

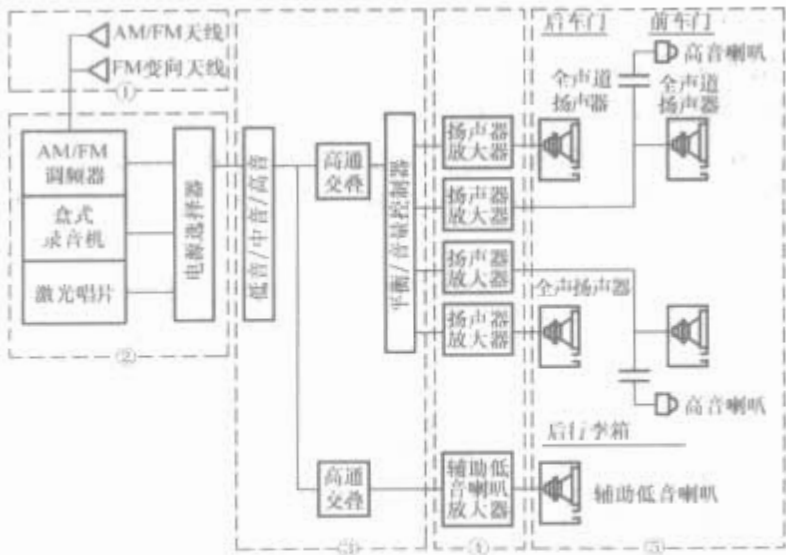


图 1.5-70 汽车音响系统

无线电接收天线，就是向空中伸出长 1cm 的导体，如图 1.5-71 所示。经过供电线与无线电调谐器的前端连接，另一端接地。

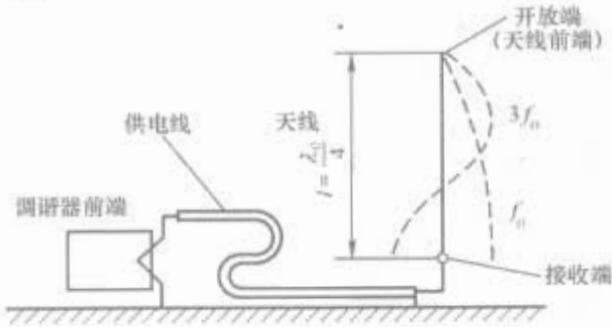


图 1.5-71 天线回路

一端开放的天线，其长度为

$$l = \lambda_0 / 4; \lambda_0 = (3 \times 10^8) / f_0$$

式中： λ_0 为波长； f_0 为频率。

许多轿车安装电动天线，通过电动机控制天线的升降。电动天线由开关、电动机、继电器、减速机构和天线等组成，如图 1.5-72 所示。

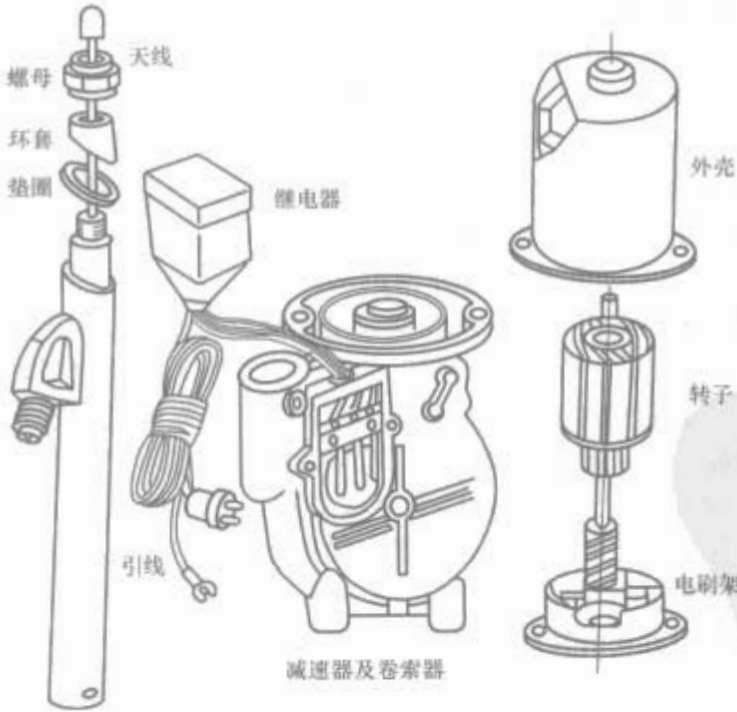


图 1.5-72 电动天线结构

天线的升降是通过改变电动机的旋转方向实现的。电动机旋转方向的改变有两种方法：改变电动机电流方向和改变电动机起作用的磁场线圈，前一种方法应用较广泛。

有些汽车的电动天线用单独的天线开关进行控制，多数则是由收音机开关联动控制，在收音机打开的同时接通电动天线控制电路，电动机转动使天线升起；在关闭收音机时天

线又同时下降，基本电路如图 1.5-73 所示。

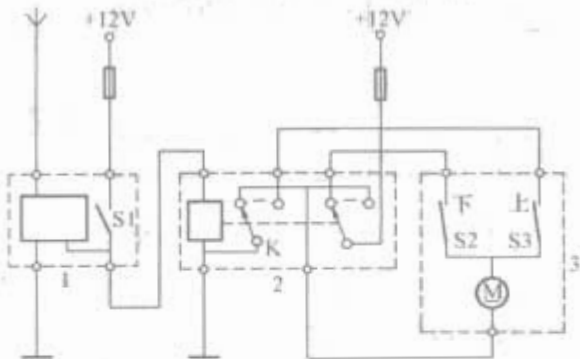


图 1.5-73 电动天线电路图

1—收音机及其开关；2—继电器；3—天线电动机

收音机开关 S1 在接通或断开时，与它连接的天线继电器 2 的线圈会同时接通或断开电源，改变继电器触点的开闭状态。电动机 3 的旋转方向由继电器的状态和电动机本身的一对互锁触点 S2 和 S3 控制。电动机旋转使天线上升或下降的同时，控制互锁触点 S2 和 S3。当天线上升到最高点时，使天线上升的触点已断开并闭合天线下降触点 S2；在天线下降到最低点时，自动断开天线下降触点 S2，同时闭合天线上升触点 S3。

当收音机开关 S1 接通时，天线继电器吸合，接通电动机电路，使天线升高，如图 1.5-74 所示。当天线达到最高位置时，电机上升触点 S3 断开、下降触点 S2 闭合，电动机停止。当收音机关掉时，天线继电器断电，反向接通电动机电路，电动机反转，使天线缩回，当天线降到最低位置时，天线降低触点 S2 断开，上升触点 S3 闭合，电机停止。

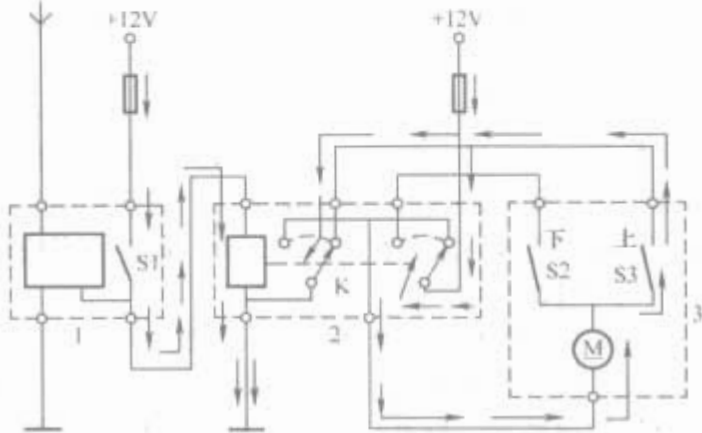


图 1.5-74 电动天线上升时的电流方向

1—收音机及其开关；2—继电器；3—天线电动机

4.2.2.2 接收装置

(1) 调谐器。调谐器是汽车音响的信号源之一，它的主要任务是接收广播电台发送的调幅和调频广播信号，并对其进行处理得到的音频信号，由此调谐器实质上就是没有音频放大电路的调幅、调频收音机。一般汽车音响都设有调幅 (AM) 和调频 (FM) 波段，对于手动机械调谐式汽车音响，FM 波段的高放、本振和混频都做在一个铁屏蔽盒里，称为 FM 高频头，它输出的是 10.7MHz 的 FM 中频信号，而 AM 波段有关元件都焊接在主电路板上。对于数字调谐式汽车音响，通常是把 AM 收音电路和 FM 收音电路分别做在两个铁屏蔽盒里，输出的就是经过解调的音频信号；还有一些集成度更高的机型，AM 和 FM 处理电路采用单片集成电路，将其做在一个铁屏蔽盒里，作为一个组件，输出就是 AM 和 FM 音频信号了。图 1.5-75 所示为调谐器工作的框图。

1) 高频增幅电路。对天线收到的弱电波进行后处理，予以增幅加强，与此同时，去除干扰波，因此要选用可变方向天线。

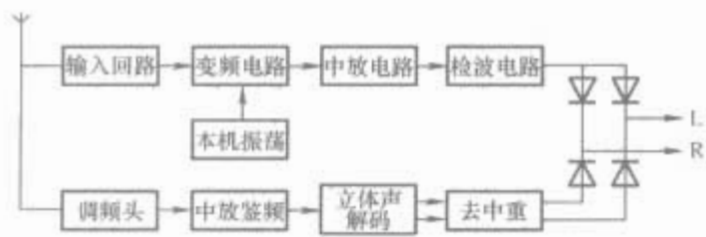


图 1.5-75 调谐器的电路框图

2) 检波电路。进行中频处理的 FM 变频波，在检波电路去除运载波，以析出立体声导向信号 (19kHz) 和立体声左右方向信号 (L, R) 的合成信号 (L-R, L+R)。

3) 立体声解调电路。用以再生可听频率的立体声左、右信号。AM 调谐器工作时，中频为 455kHz，在没有立体声解调电路的情况下，从检波电路发射出单通道发射信号波。

4) 相位锁止回路合成。从几种发射频率中选择所要求的发射波 (即获得同调) 的机构。自 20 世纪 70 年代后半期应用数字技术的电子同调合成器问世以来，迄今已成为汽车无线电主流。当接收 82.5MHz 发射波时，为了从混合电路输出中频 10.7MHz，局部振荡电路的区域频率 f_0 为 $f_0 = (82.5 - 10.7) \text{ MHz} = 71.8 \text{ MHz}$ 。

超外差收音机的特点就是具有变频电路，它的作用是把输入电路选出的不同频率的电台信号变为固定频率的中频 (465kHz)，并且变换的只是载波的频率，而信号的包络线 (音频信号) 与原高频信号的包络线不变。对变频电路的要求包括变频增益、选择件、失真、稳定性、频率覆盖、噪声电平和统调等方面。

(2) 盒式录音机。盒式录音机是用来读出和再生磁带记录的模拟信号。汽车音响的标准尺寸 (欧洲车型按 DIN 标准) 为：长×高×深=180mm×50mm×153mm。盒式录音机一般由机芯、电动机、磁头，以及放音降噪电路、自动选曲电路等组成。盒式磁带从插入口插入时，磁带转动机构运转，自动把磁带卷入，放置在规定的位

置。此外，当按撤操作面板的 Eject 按钮时，磁带会自动弹出。

在盒式磁带工作时无线电调谐器不工作，面板前面的操作开关是由无线电用开关与双功能开关组成。无线电的调谐功能使磁带加速运送、后转；选择按键的功能，使磁带 A 面与 B 面转换，来回演奏。

(3) 激光唱机。激光唱机又称 CD 唱机，是精密的光学、机械系统及先进的数字信号处理、伺服技术相结合的产物。激光唱机具有优异的电声指标，其信噪比和动态范围远远优于传统的电唱机。激光唱机具有自动选曲、程序重放、遥控操作等功能，激光唱片又不易磨损，曲目丰富，成为汽车音响的重要组成部分。激光唱机主要由激光拾音器、伺服传动机构、数模转换系统、控制及显示电路等组成，如图 1.5-76 所示。



图 1.5-76 激光唱机的组成

1) 激光拾音器。激光拾音器又称光学头，是读取 CD 唱片信号并产生供聚焦伺服使用的聚焦误差信号和跟踪伺服使用的跟踪误差信号。激光头从结构上来说可分为单光束和

三光束两种。三光束激光拾音器是用主光束读取信号，两侧的副光束可测量循迹偏离，以保证主光束的准确工作。单光束拾音器是用单一光束兼顾读取信号和测量循迹偏离误差。三光束方式循迹准确，但成本较高；单光束方式结构简单，成本较低。激光拾音器由激光源、聚光镜、反射镜等组成，如图 1.5-77 所示。

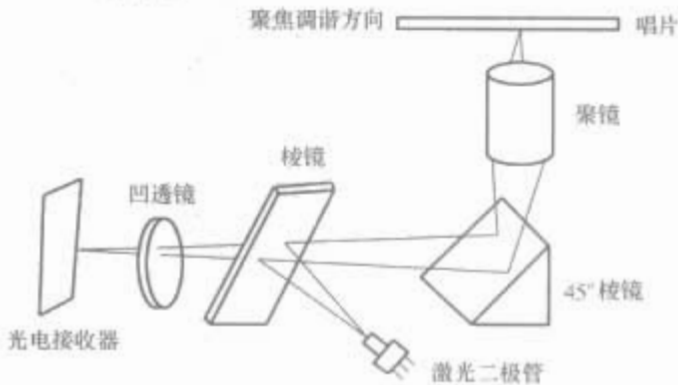


图 1.5-77 激光拾音器的组成

2) 信号分离与处理电路。激光拾音器输出的电信号送入信号分离与处理电路。该电路中的数据分离器能正确识别左、右声道信号及各种信号代码。分离后的信号送至信号处理器。信号处理器将含有音频信号的数字信号进行解码，使其变成标准的脉冲编码，送至数/模转换电路。同时信号处理器还将同步信号、纠错信号及电动机测速信号检出，将有关的控制信号送至控制系统。激光唱机中的信号分离与处理均采用大规模集成电路实现。

3) 伺服系统。伺服系统采用聚焦伺服电路和循迹伺服电路，处理 CD 唱片转动中的误差及唱片误差。聚焦伺服可保证 CD 唱片的信息区正好位于聚光镜的聚焦平面上，循迹伺服用来克服唱片加工精度不好所引起的误差。自动稳速伺服电路，通过测速传感器给出的校正误差信号来控制电动机，使之转动稳定。

4) 数模转换电路。数模转换电路又称 D/A 转换器，在激光唱机中也称 DAC，用于将激光拾音器送来的数字信号转换成音频模拟信号。D/A 转换电路输出的信号经低通滤波后，可直接送往放大器。

5) 控制系统和显示器。控制系统对激光拾音器等传送的数字信号进行分析，获得各种控制依据，并对电动机、伺服系统和显示器实施控制。如通过唱盘电动机驱动器得到恒线速误差信号控制唱盘电动机恒速运动，使 CD 片从最内圈的 500r/min 逐渐变为最外圈的 200r/min。在激光唱机中，控制系统通常由一片大规模集成电路组成。显示器用来显示各种控制信息，如正在放唱的曲目号、放唱方式、放唱时间等。显示系统由单片微处理器和 LED 显示屏组成，激光唱机的显示屏一般做得较大，以适应多种信息显示的需要。

激光唱机一般具有自动存取唱片、选择放唱、编辑加工、长期记忆的功能。多片激光唱机在 CD 唱片仓盒中可同时安放多张唱片，又称换片式 CD 唱机。多片激光唱机分抽屉式和转盘式两种。抽屉式激光唱机是将多张唱片平行装入一个换片盒内 (最多可达 7 片)，放唱时可连续放音，换片时间为 5~6s；转盘式激光唱机采用开盖方式，转盘上放置 3~5 张激光唱片，开机后可无限循环进行放唱，中途不用打开或中断放唱换片。

4.2.2.3 音频处理电路

对音源来的信号进行增益放大控制、A/D 转换、微机模式切换控制等并按照车厢内扬声特性及听者爱好，增强或减弱频率带，具有修正扬声的功能，设有只通过特定频域的滤波器和增幅控制电路，进行声场控制，以提高车内音质。

4.2.2.4 功率放大部分

放大器将各种节目信号进行电压放大和功率放大，然后推动扬声器发出声音。放大器的组成框图如图 1.5-78 所示。

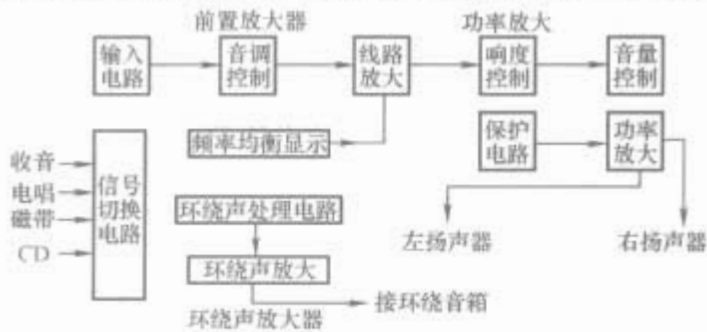


图 1.5-78 放大器的组成框图

(1) 前置放大器。前置放大器又称前级放大器，它连接信号源及控制信号的开关，并对各种节目进行必要的处理和电压放大。前置放大器与信号源之间不是简单的连接，其内部还要设置各种均衡电路，用于实现前后级的阻抗匹配和频率补偿。前置放大器主要包括输入电路、音调控制和线路放大。

输入电路对收音机、激光唱机和磁带送来的信号进行均衡和控制，包括阻抗和频率的均衡。

音调控制对节目信号的各段频率成分进行提升或衰减，以便满足欣赏时的不同需要。

线路放大，由信号源传送来的信号需要放大到一定的电压值才能推动功率放大器，线路放大器通常把弱信号放大到 0.2~1V，以便和功率放大器配接。

(2) 功率放大器。功率放大器主要对前置放大器送来的电信号进行不失真的电流放大，形成强有力的功率信号去推动扬声器发声。功率放大器主要包括以下几部分：

1) 等响度控制电路。由于人耳收听低声压级信号时，具有在低频和低频呈衰减的特性，所以在小音量的情况下欣赏音乐时有信号失真的感觉。等响度电路的作用是对小信号中低频和高频部分进行补偿，以弥补人耳的不足；而在大信号重放时，等响度电路不起作用。

2) 音量控制。用以调节重放音量的大小。调节方法有手动电位器、电子音量控制和伺服电动机带动旋钮控制音量。

3) 功率放大。把前置放大器送来的信号进行电流和电压放大，以推动扬声器发出声音。

4) 保护电路。由于功率放大器工作在大电流和高电压状态，重放中可能会出现过电流、过电压和过热等情况，此保护电路可自动进行断电，以保护放大电路和扬声器不受损坏。

(3) 环绕声放大器。环绕声能使听众更具有临场感，使人在欣赏音乐时有被声音围绕的感觉。环绕声放大器主要包括以下两部分：

1) 环绕声处理电路。它利用信号延迟方法产生环绕声效果。前方音箱重放正面声源，而环绕处理电路输出经过延迟的环绕信号，以产生一种音乐厅堂的混响效果。

2) 环绕声放大器带动环绕音箱发声。由于环绕声放大器用于模拟反射声，故其频响一般不需要很宽，功率也不需要过大。

4.2.2.5 扬声器系统

主要指主扬声器、环绕扬声器等，是汽车音响系统的终端，最终决定车厢内音响性能。由于汽车音响的特点，必须形成多个扬声器系统。主扬声器中通常由低音扬声器、中音扬声器、高音扬声器和分频网络组成。一般环绕声只重放

7kHz 以下的反射声，只需一个中低音扬声器即可。扬声器口径大小和在车上安装方法、位置是决定音响性能的重要因素。为了欣赏立体声音响，车上最少要装两个扬声器。图 1.5-79 所示为各总成的配置情况。



图 1.5-79 音响组件配置图

4.3 无线电防干扰装置

汽车电波干扰源主要是点火系统，由于断电器、配电器、火花塞及调节器等处都存在着一一定的触点间隙，因而在工作时就会冒火花从而产生电磁波。其频率从数百千赫到数百兆赫，所以一般中短波收音机及电视机都会受到不同程度的干扰。此外发电机电刷和集电环工作时所产生的火花，也会使收音机产生杂音。还有闪光器、触点式仪表传感器、电喇叭、刮水电动机等，在工作时也会产生微小的电磁波。

要防止以上干扰，除了从电子设备本身采取抗干扰措施，如在收音机天线上加扼制线圈，在电源上加滤波器等以外，还必须在产生干扰电磁波的汽车电器上采取抑制措施，通常采取的措施有以下几种：

(1) 加装阻尼电阻和高压阻尼线。在点火系高压电路中串入阻尼电阻，可以削弱电火花产生的干扰电磁波。试验证明阻尼电阻的阻值越大，抑制效果越好。但阻值过大又会影影响火花塞电极间的火花能量，因此一般不超过 20kΩ。阻尼电阻加装在点火线圈的高压导线引出端或火花塞上。

(2) 加装并联电容器。在可能产生火花时并联一个电容器，能吸收电火花，达到削弱干扰的目的。一般在水温表（采用触点式传感器）、油压表的传感器触点间并联 0.1~0.2μF 的电容器；在闪光灯、电喇叭触点处并联 0.5μF 的电容器；在触点式调节器的“点火”接线柱或硅整流发电机的“+”接线柱处并联 0.2~0.8μF 的电容器。典型电容器防干扰系统如图 1.5-80 所示。

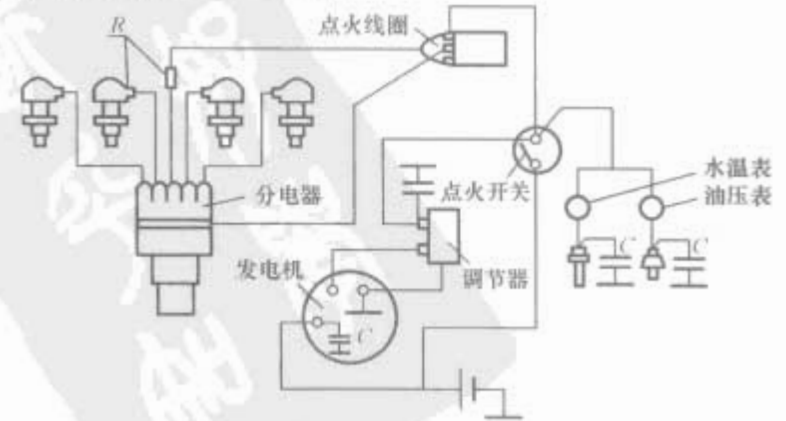


图 1.5-80 电容防干扰系统

(3) 加装金属屏蔽。将汽车上容易产生电火花的装置，如点火线圈、发电机、调节器和触点式传感器等，用金属罩遮盖，将有高频电流通过的导线用密织的金属网或金属管遮

盖，并使其搭铁，也可抑制干扰。采用这种方法时，必须遮盖完全，并且在金属罩之间以及金属罩和车体之间接触要良好，使之具有同一电位。

为了获得较好的抑制干扰效果，往往将上述三种方法合并使用。北京 BJ2020 型汽车所装用的 QGY-111 型汽车无线电抗干扰装置如图 1.5-81 所示。

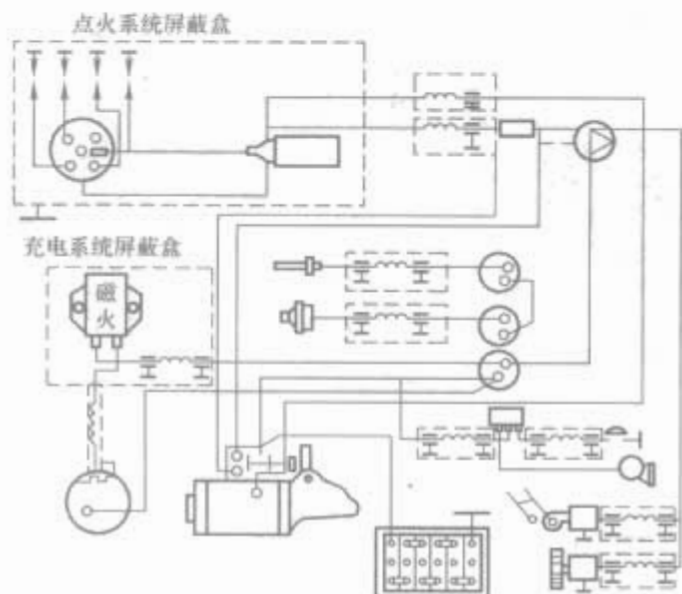


图 1.5-81 北京 BJ2020 汽车装用的 QGY-111 型汽车无线电抗干扰装置

4.4 使用与维护

4.4.1 数字调谐收音机的正确使用

(1) 接收天线应良好，连线可靠。汽车音响的接收天线有拉杆天线（手动和自动）和后挡风玻璃上的条状金属膜天线（也称印刷天线）两种。在接收调幅广播和调频广播时，拉杆天线应拉出，确保收听效果。天线与收音机的连线应可靠，拉杆天线应保持干燥、无锈蚀并升降灵活，手动拉杆天线要及时收回。

(2) 注意防止干扰。当汽车在电磁干扰较强的场合时（例如接近雷达、无线电发射台、吊车及电焊切割等场合），应停止使用收音机。

(3) 用好电台储存功能。数字式收音机可存储电台的频段。使用时将平时经常收听的节目存储在收音机内，由于收音机的记忆作用，重新开机后，记忆便生效。

4.4.2 收音机常见故障的诊断与排除

(1) 开机后无声。检查电源指示灯，如不亮，应重新接好电源插头。查看收音机上的静噪开关的位置，按下开关表示静噪，此时无声，只能用耳机收听；抬起开关，应有正常重放音。检查收音机与放大器的连线是否良好，逐一检查后开机试听。

(2) 无调频或调幅声节目。首先检查调频、调幅天线是否接好，因为金属屏蔽罩的作用，一旦天线断路，便无正常的重放音，仔细将天线接好后开机试听。对于数字式收音机，如采用定时关机功能，原来储存的电台频段记忆会消失，故无正常的电台节目，应重新设置电台的存储频段，应少使用定时关机功能。

(3) 放音杂声大。检查收听环境附近有无电磁波干扰；检查天线或输出信号线是否接触不良；检查调谐旋钮或音量控制钮是否过脏，若过脏可用酒精清洗，待酒精挥发后试听。

(4) 收音灵敏度下降。检查天线位置是否正确，接线是否良好；各开关是否接触不良。

4.4.3 激光电唱机的使用与维护

4.4.3.1 激光电唱机的正确使用

(1) 注意合理安放。激光电唱机的位置应避免剧烈振动及重物碰撞。

(2) 正确取放唱片。打开唱片仓盘后，要将唱片的标签面朝上放入仓盘。如唱片装反，将无法放唱。

(3) 不要将其他物品放到唱片盘上，也不要将两张唱片重叠在一起放唱，否则将会加重驱动系统的负担，并可能造成损坏。

(4) 对于设有数字信号接口的 CD 唱机，应尽量使用该接口，将输出的信号送至外接的数字解码器，最后送到放大器，这样可获得更优良的音质。

(5) 注意各接口的连接位置正确。

4.4.3.2 常见故障诊断与排除

(1) 放音无声。装好唱片，按动放音键后无声音。检查唱片是否放正，开机后如果未显示唱片的曲目数，而是显示出错符号，说明激光唱片的位置没有放好。打开唱片仓，将激光唱片重新摆正后即可放音；检查激光唱机与放大器之间的信号线，将信号线反复拔插或左右互换以判断是否接触不良或断线。

(2) 放音时不进片。

1) 检查唱片是否损坏。可取出激光唱片对光检查，看有无漏光处或有无明显的划痕和油污。这些问题会引起激光拾音失灵，造成放唱中断。

2) 反复按动放音键，看能否恢复正常放音，因为激光唱机内产生的误动作也会使放唱中断，重新启动几次可恢复正常。

3) 上述方法不能奏效时，则要打开机壳，检查激光拾音器的光学头是否有脏物。若有脏物，可用擦镜头纸蘸酒精清洗光学头，然后开机，用一张好唱片放音试听。

4) 若机内电路损坏，应检修电路；在检查和清洗光学头时，应在断电情况下进行，以避免激光灼伤眼睛。

(3) 遥控失灵。检查遥控发射器电池供电是否正常，可换上新电池试一试；检查激光唱机附近有无强电、强磁和强光干扰；检查遥控器的按键是否接触不良，可清洗按键触点。

4.4.3.3 激光唱片

激光唱片又称 CD。自 20 世纪 80 年代问世以来，得到了迅速发展，许多珍贵的音乐资料录制成激光唱片后大放光彩、开创了数字音乐的新时代。

(1) 激光唱片的结构。激光唱片的结构如图 1.5-82 所示。激光唱片分为 8cm (3in) 和 12.7cm (5in) 两种，国内常用 5in 激光唱片。在一张直径为 5in 的激光唱片上，可录 25 亿个坑点，坑点的长度和彼此间的距离不同，可以组合成多种不同的信息。坑点的表面镀有银反射膜。在激光唱片放唱时，激光束对唱片表面进行扫描。光束照射在“坑”上时会产生部分绕射，光束照射在坑与坑之间的点平面时，激

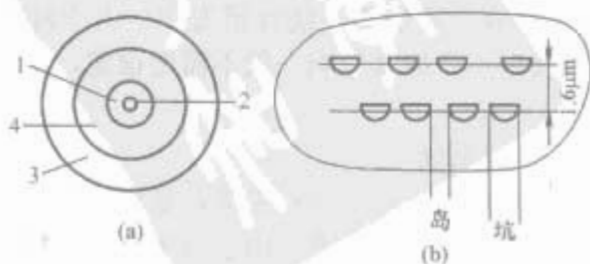


图 1.5-82 激光唱片的结构

1—开始区；2—中心孔；3—终止区；4—节目区

光会全部反射回去。激光束的反向光根据坑点之间长短不同而得到强弱不同的光信号。

激光唱片一般都为单面放唱,有坑点信号的面称为正面、印有商标的一面称为背面。放唱时,应将商标面朝上放入片仓。激光唱片的放唱时间最长为70min。

(2) 激光唱片的挑选。每张激光唱片上都有3个字母组成的标注,以说明该唱片在录音、混音和制版方面采用的是哪种录制方式。常见的录制方式有以下3种:DDD、ADD和AAD。

1) DDD。表示该唱片采用数字录音机录制、数字混音/剪辑和数字制版。这是激光唱片制作技术中最好的方式。

2) ADD。表示该唱片采用模拟式录音录制、数字混音/剪辑和数字制版。其效果略低于同档次的DDD式唱片。

3) AAD。表示模拟式录音机录制、模拟技术混音/剪辑和数字制版。其效果比ADD方式制作的激光唱片略逊一筹。

选择激光唱片时应注意以上所讲的录制方式。一般来说DDD录制方式效果最好,ADD录制的CD唱片噪声较大。

选择激光唱片还应注意CD唱片表面的反射膜质量,反射膜有金、银、铝3种。金、银膜反射率较好,价格较高,常见的是铝膜。反射膜的质量直接影响放音的质量,挑选时应检查有无漏光,漏光严重的唱片会在放音过程中出现跳槽、停顿或噪声增大等故障。

CD唱片表面不应有气泡、划痕或片基凹凸不平、扭曲变形等,否则放音时数字信号将不能被正确检拾,严重时还会损坏激光唱机。

4.4.4 磁带放音机的使用与维护

4.4.4.1 磁带放音机的正确使用

(1) 按磁带放音机说明书中规定的使用操作步骤操作。如放音过程中不按停止键就改为快进或快退、放音过程中直接按动开仓门键取磁带等,都有可能损坏放音机。

(2) 操作时要轻按动、轻释放,避免用力过猛造成机件损坏。

(3) 放音中如要进行快进或快退,都要先按停止键后再转换,防止机芯的转动部件突然改变受力而损坏。

(4) 只有在静止情况下才能打开仓盒,装取磁带。

(5) 尽量减小使用暂停键以延长放音机的寿命。放音机暂停时电动机仍在运转,一些部件因此而处于受力状态,暂停时间过长、暂停次数过多,对放音机都不利。

(6) 要使用质量好的录音带。选用优质的录音带进行放音,不仅能保证放音的音质,对放音机寿命的提高也会起到重要作用。质量不好的磁带,其表面磁颗粒粗,边缘不齐,运行阻力大,磁头、电动机不容易磨损。

(7) 自动选曲功能只能在放音状态下进行。一般可在走带的正、反两个方向上自动选择所需要的节目,正向选曲是以快进方式把不需要的节目越过后放音,反向选曲是以倒带的方式越过不需要听的节目,然后在预定节目处重新转入放音状态。

(8) 正确使用杜比降噪系统。

1) 只有标注杜比降噪标记的原声带,才能在杜比状态下放音。接通杜比开关即是杜比状态方式,断开开关则是普通放音方式。

2) 不应在杜比方式下放普通磁带,也不要普通方式下放杜比磁带,否则会使重放音质变差。普通磁带在杜比状态下放音,高频衰减过多,效果不佳;反之杜比磁带在普通方式下放音,高频中的噪声未被衰减,重放时噪声变大,十

分刺耳。

3) 杜比系统只能降低磁带自身产生的噪声,对机械传动及信号源中夹杂的固有噪声则无能为力。

4.4.4.2 磁带放音机的日常维护

(1) 对磁头进行定期消磁。放音磁头经常与磁带接触,很容易产生剩磁。磁头产生剩磁后会影晌放音质量,如高频信号衰减、噪声增大等,因此应定期对磁头进行消磁。可用专用的磁头消磁器,将盒式消磁器装入带仓内,在断开主机电源的情况下,按下放音键,消磁器上的红色指示灯点亮,表示开始对磁头进行消磁;指示灯熄灭,表示消磁完毕。为彻底消磁,还可连续消磁几次。

(2) 定期清洗。对磁头应进行定期清洗,因为磁头上经常沾有来自磁带上的磁粉,不去掉不仅影响放音质量,而且还容易结垢腐蚀磁头。可采用清洗带,涂上清洗剂后便可按下放音键,让清洗带在仓盒内转动,把磁头上的磁粉等脏物去掉。还可用水酒精棉球对磁头表面进行擦洗,注意棉球应裹在木杆上,不要用金属镊子夹棉球擦洗,避免划伤磁头表面。除了对磁头的清洗之外,还要清除机壳内的灰尘,特别是印刷板上的灰尘。最好用吹气法或吸尘器吸灰法,即用高压氮气等不易燃烧的气体吹出线路板上的灰尘,或将吸尘器管换上较小的吸尘头,吸出机壳内的灰尘,注意不要损坏元件。不具备上述条件时,可用酒精棉球擦除灰尘,但要注意棉球易被焊点拉出丝来,残留在机壳内造成故障;擦完后要待酒精挥发后才能开机使用。

(3) 定期注油。放音机的机芯在长期使用后,相互配合的零件间原有的润滑油可能自然挥发,致使传动部件的摩擦阻力明显增大,失去转动的灵活性,引起机械噪声增大,降低了机芯的机械性能,给配合零件间加注润滑油,能减少摩擦阻力和摩擦损耗,提高传动件的传递效率,提高机芯的使用寿命。

给传动部件加油,机芯的转动部件主要有电动机主轴、轴承及各轮轴承等。它们通常为含油轴承,在制造过程中已经注入过一定的润滑油,工作一定时间后需进行补充,可用油针或钢丝沾一定的油珠滴入轴承孔内或轴根部位。

给按键的导向部位注油,机芯各种功能按键在正常操作情况下应轻快灵活,手感舒适。由于按键的次数太多,其润滑部位的摩擦阻力可能增大,当操作按键觉得很费力时,应向按键涂油。

5 辅助汽车电器

5.1 电源总开关

5.1.1 分类

电源总开关按其操纵方式,通常可分为闸刀式和电磁式两种,前者又称为机械式,后者则靠电磁力操纵。

5.1.2 闸刀式电源总开关

闸刀式电源总开关主要由操作手柄、外壳和刀形触头等组成。一般用于对铅蓄电池搭铁线的控制。使用时,只需将操作手柄向下按,电源即接通,向上扳起则电源断开。闸刀式电源总开关由于其结构简单、价格低、工作可靠、使用寿命长,曾被广泛使用。其缺点是它只能安装在驾驶员附近的地板上,往往离蓄电池较远,连接导线较长,加上这种机械式开关本身触点压降就较大,易造成低温起动困难。另外,由于安装在地板上,操作不方便,容易发生无意拨弄而断电现象。

5.1.3 电磁式电源总开关

电磁式电源总开关有单线圈式和双线圈式两种。

5.1.3.1 单线圈式电源总开关

单线圈式电源总开关的典型结构如图 1.5-83 (a) 所示，图 1.5-83 (b) 为其电路控制图。

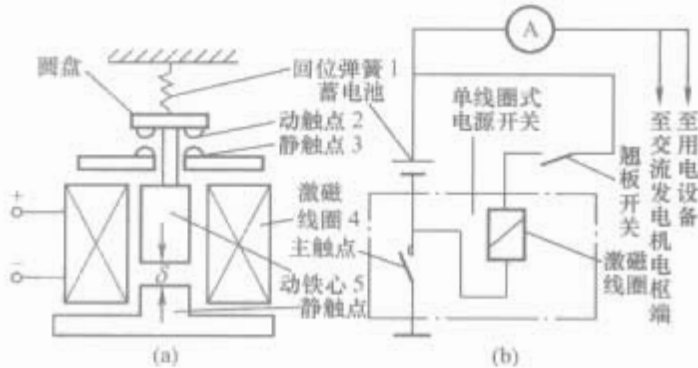


图 1.5-83 单线圈式电源总开关结构及控制电路
(a) 单线圈式电源总开关结构原理示意图；
(b) 单线圈式电源总开关控制电路

静触点 3 装在接线板的内侧，动触点 2 装在一圆盘上，并与中心杆、动铁心 5 固定在一起。触点 2 和触点 3 分别与蓄电池搭铁（负极）极和车架连接。

激励线圈的电路是通过翘板开关（或点火开关）来控制的。当翘板开关（或点火开关）接通时，激励线圈内就有电流通过，其产生的电吸力吸动线圈中的铁心 5，克服回位弹簧 1 拉力使触点闭合，蓄电池搭铁极便与车架连接。

当翘板开关（或点火开关）切断时，激励线圈 4 失去电源而电磁力消失，回位弹簧 1 将铁心拉回原位，触点分开，蓄电极搭铁极断开。

5.1.3.2 双线圈式电源总开关

双线圈式电源总开关，其典型结构及控制电路如图 1.5-84 所示。由图 1.5-84 (a) 可知，激励线圈由吸拉线圈 6 和保位线圈 7 组成。当按下翘板开关 8 接通激励电路时，吸拉线圈 6 先得电，由于保位线圈 7 被断触点 4 短路，此时电阻小而激励电流较大，产生较强的电磁吸力。当动铁心 8 向下移动时，切换拨片将断触点 4 分开，保位线圈 7 与吸拉线圈 6 串联工作，保位线圈导线直径小而匝数多，阻值大，以减小长时间工作的激励电流。

当切断电源回路时，激励线圈中电流突然切断而产生较高的自感电势，这种浪涌电压一方面对电子元器件易造成损坏；另一方面在触点间会产生火花，从而降低了电源开关的使用寿命及可靠性。为此，电路中一般加有如图 1.5-84 中的一只续流二极管，使激励线圈自感电势自成回路泄放掉。

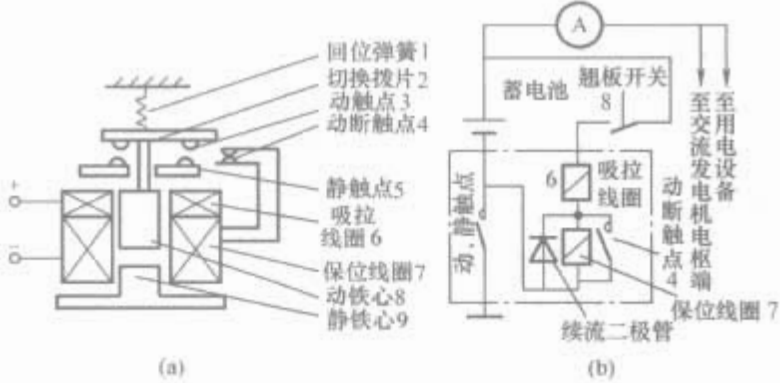


图 1.5-84 双线圈式电源总开关及控制电路
(a) 双线圈式电源总开关结构原理示意图；
(b) 双线圈式电源总开关控制电路图

5.1.4 永久磁铁式电源总开关

永久磁铁电磁式电源总开关电路如图 1.5-85 所示。它是将单线圈电磁式电源总开关中的静铁心改为永久磁铁。

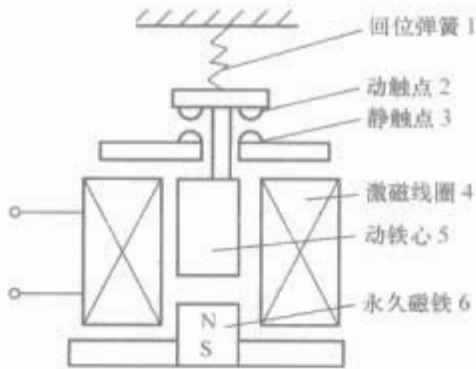


图 1.5-85 永久磁铁电磁式电源总开关结构示意图

当需要接通电源回路时，激励线圈 4 得电产生磁场，其极性与永久磁铁 6 相反而产生吸力，待动铁心 5 与静止的永久磁铁 6 接触后，激励线圈 4 失电，此后动铁心 5 被永久磁铁 6 磁化而相互吸引，电源回路被接通。

当需要切断电源回路时，控制开关将激励线圈 4 反相通电，激励极性与永久磁铁 6 同极性而产生斥力，动铁心 5 向上移动，直至触点分离，电源回路被切断。

5.1.5 电磁锁销式电源总开关

电磁锁销式电源总开关结构原理示意如图 1.5-86 所示。它是在现有电磁双线圈式电源总开关的动铁心上加工一环形槽，侧面安装一锁销 7，用主线圈 1 与锁止线圈 6 联合作用控制锁销 7 的入槽和出槽，实现了动、静触点的闭合和分离。

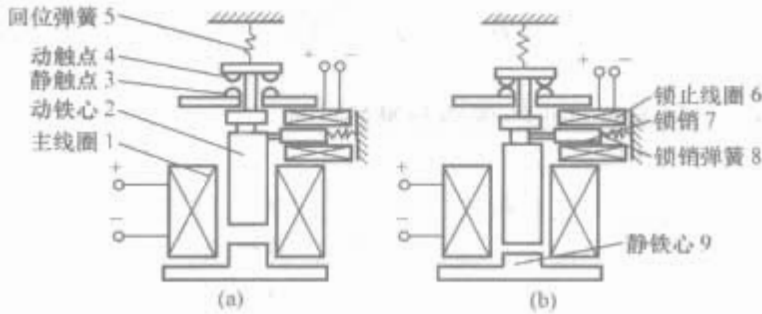


图 1.5-86 电磁锁销式电源总开关结构原理示意图
(a) 触点断开位置；(b) 触点闭合位置

为了能可靠地使锁销 7 退出环槽面切断电源回路，在锁止线圈 6 电路上设有延时电路。

电磁锁销式电源总开关的控制电路如图 1.5-87 所示。当按下开关 S2 时，主线圈 1 与锁止线圈 6 同时得电，动铁心 2 向下移动少许，锁销 7 退出环槽，松开 S2 后，主线圈 1 立即失电，动铁心 2 在回位弹簧作用下向上移动，锁止线圈 6 则滞后一段时间断电，使锁销 7 不致妨碍动铁心 2 向上移动。由于动静触点 4、3 闭合后靠锁销 7 定位，主线圈只在接通和断开电源的短时间内通电，从而达到安全节能的目的。

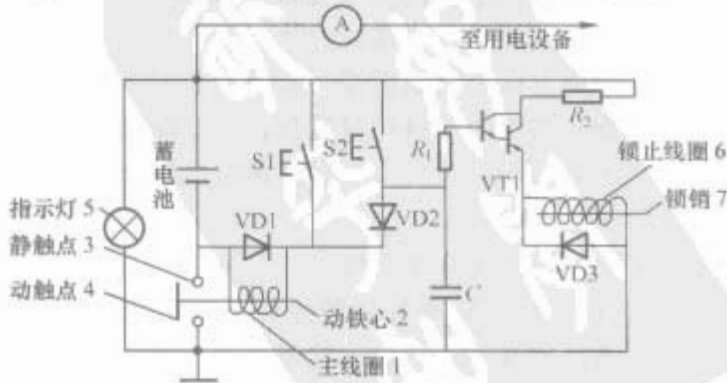


图 1.5-87 电磁锁销式电源总开关控制电路图

这种电源总开关虽然省去了保位线圈、动断触点和切换拨片，但增加了锁止线圈、锁销和控制电路，使结构复杂，制造成本也增高。

5.1.6 机械锁止电磁式电源总开关

机械锁止电磁式电源总开关的结构原理示意图如图 1.5-88 所示。它是在电磁式电源总开关的动铁心 3 上加工一环形凸轮槽 7。锁止用弹簧钩一端与壳体固定，一端与环形凸轮槽 7 接触，当弹簧钩位于环形凸轮槽 7 的 a 点时，动、静触点 5、4 处于分离状态，电源回路不通。

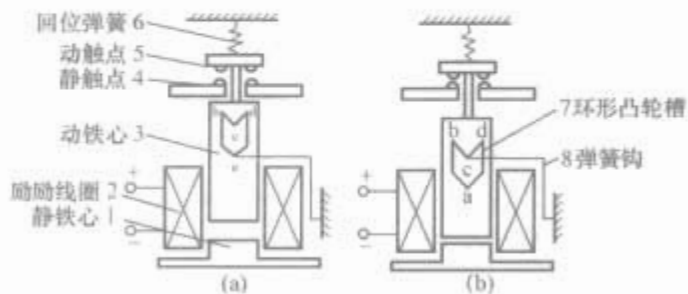


图 1.5-88 机械锁止电磁式电源总开关结构原理示意图
(a) 触点分开；(b) 触点闭合

机械锁止电磁式电源总开关控制电路如图 1.5-89 所示。当需要接通电源回路时，按下动合按钮 S，励磁线圈 2 得电产生磁力，吸引动铁心 3 向下移动，弹簧钩从 a 点移至 b 点。

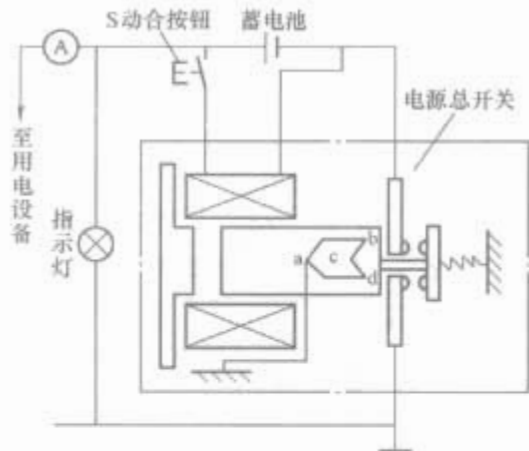


图 1.5-89 机械锁止电磁式电源总开关控制电路

松开动合按钮 S 后，励磁线圈 2 失电，磁力消失，动铁心 3 在回位弹簧作用下向上移动，弹簧钩从 b 点移至 c 点，并将动铁心 3 锁止在此位置，动、静触点 5、4 闭合，指示灯亮，表示蓄电池电源回路已被接通。

当需要切断电源回路时，再按一次常开按钮，励磁线圈得电，磁力吸引动铁心向下移动，弹簧钩从 c 点移到 d 点。松开常开按钮后，励磁线圈失电而磁力消失，回位弹簧将动铁心向上拉动，弹簧钩则从 d 点移到 a 点，同时将动铁心锁止在此位置，动、静触点分离而切断电源回路，指示灯也熄灭。

由上述可知，当动铁心在电磁力和回位弹簧的作用下移动时，弹簧钩一端在环形凸轮槽内只能作单方向循环移动，并分别停留在 a 点或 c 点，达到机械锁止触点闭合与分离位置。

这种电磁式电源开关有如下特点：

- (1) 安全省电。它只在接通和断开电源回路的短时间内励磁线圈通电，这样，即使驾驶员停车后忘记关断电源，也不致造成蓄电池长时间向励磁线圈放电，指示灯也可起提醒作用。
- (2) 结构简单、工作可靠、操作方便。它没有保位线圈、动断触点及切换拨片，从而避免了它们带来的弊端，操作时只需一个动合按钮。

5.2 柴油机的辅助起动装置

冬季，由于进入柴油机内的空气温度较低，压缩后混合气达不到着火温度，因此起动比较困难。为了使柴油机冬季能可靠而迅速起动，在柴油机的燃烧室内装用了预热器，

用来提高汽缸内的空气温度，使喷入燃烧室内的柴油颗粒易于点燃。

5.2.1 起动预热装置结构

起动预热装置主要元件是预热器，再配上相应的控制电路组合而成，其简化电路如图 1.5-90 所示。



图 1.5-90 起动预热简化电路图

预热器有电热式预热器、热胀式火焰预热器和 PTC 预热器等。在电路中的接线方式有并联和串联两种，常采用并联方式。

5.2.2 正温度系数热敏电阻预热器

PTC 即正温度系数热敏电阻陶瓷加热元件。它具有无明火、升温快、自控恒温，寿命长（半永久性）等优点。

用于汽车低温起动的 PTC 陶瓷加热器有支管式和平盘式两种。它们的共同特点是热效率高、体积小、结构简单，直接固定在汽化室内壁上，可对汽化室直接加热，使其温度迅速升高，从而提高燃料的汽化效率。这既有利于汽车在低温下起动，又可减少废气污染，当然也降低了油耗量。由于 PTC 热敏电阻具有自控温度加热特性，因而这类加热器具有无触点动作特性，非常适合工作环境不断变化的汽车使用。

PTC 预热器中选用的 PTC 元件是低阻、低耐压、大功率的薄片状元件。图 1.5-91 所示为平盘式和支管式加热器的外形结构。其具有耐热性、绝缘性和密封特性。

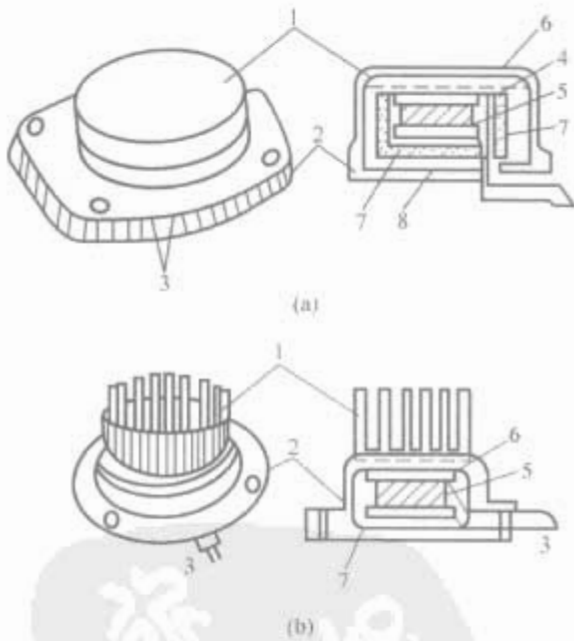


图 1.5-91 平盘式和支管式加热器外形结构
(a) 平盘式；(b) 支管式

- 1—导热散热管（散热盘）；2—支管（盘状）加热器底座；
- 3—电极引线；4—电极兼传热；5—PTC 元件；6—绝缘层；
- 7—绝缘容器；8—压紧弹簧

图 1.5-92 所示为混合器加热器的结构。早期为保护汽车在严酷环境下使用的 PTC 元件，常将其密封在金属等外壳中使用。但现在为提高加热器的即热性、响应性，提高加热效率以及通过对加热器结构上的简化来降低成本，就要求 PTC 热敏电阻器在裸露状态下使用。然而，在汽车的环境下，当裸露使用时，PTC 热敏电阻器常因燃油等的影响而导致陶瓷的还原老化和电极的腐蚀，以前的 PTC 热敏电阻

器已不适用。必须采用由不还原老化的陶瓷，即采用耐还原性好的陶瓷和耐腐蚀电极制成的高性能 PTC 热敏电阻器。

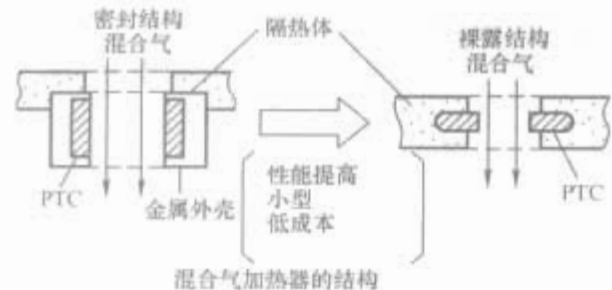


图 1.5-92 混合气加热器结构示意图

5.2.3 电热式预热器

电热式预热器俗称电热塞，有开式和密封式两种。它是用螺纹拧装在发动机汽缸盖上，下端炽热部分伸入汽缸的预热室或燃烧室内。

5.2.3.1 电热式预热器结构

(1) 开式电热塞。其电阻丝通常是由直径为 1.6~2mm 的镍铬丝制成，由于电阻丝露在外面而容易受到腐蚀，寿命较短，现在已不使用。

(2) 密封式电热塞。该电热塞的旋形电阻丝由铁镍铂合金制成，它的一端焊在中心螺杆上，另一端焊在用耐热不锈钢制成的发热体钢套底部。在螺杆与外壳之间用瓷质绝缘体隔开。而在钢套与电阻丝之间填充有一定绝缘性能好、导热性好、耐高温的氧化铝。其内部电流路径为中心导电杆—电热丝—发热钢套—外壳—搭铁。

5.2.3.2 电热式预热器电路

电热式预热器的接线方式有并联和串联两种，通常多为并联，如图 1.5-93 所示。

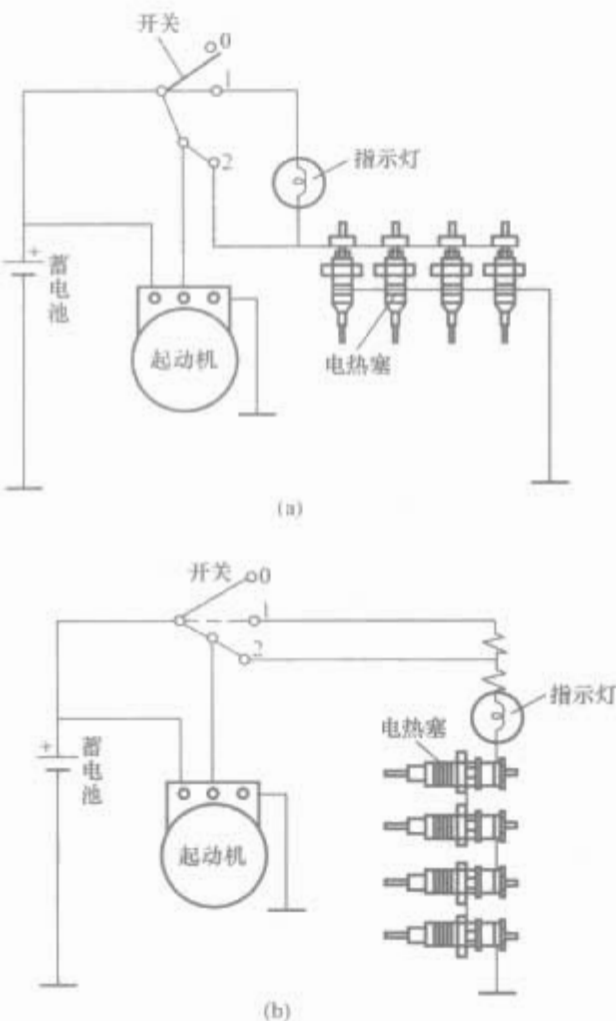


图 1.5-93 电热式预热器电路
(a) 并联接法；(b) 串联接法

5.2.3.3 电热式预热器原理

在冬季气温低的情况下起动发动机时，先将起动开关拨至“1”挡，预热器电路接通，开始进气预热，一般预热时

间为 50s，不要超过 1min；再把起动开关拨至“2”挡，发动机即可顺利起动。

为了监视预热器电路是否通电工作，电路中还加装有预热指示灯。预热时该指示灯点亮。预热器的工作电流为 2~6A，正常车用寿命为 1000 次以上。

5.2.4 热胀式火焰预热器

热胀式火焰预热器有一个线膨胀系数较大的管状阀体，管内有空腔，顶端有油管接头，用油管与专用的小燃油箱连通；下部靠螺纹与阀芯固连一起，阀芯顶端将小油孔封闭。阀体外面绕有镍铬电热丝，电热丝的一头与外壳相连并搭铁，另一端形成接线柱。预热器不工作时，在阀体冷缩作用下使阀芯锥形尖端将小油孔封闭。

当发动机起动时，起动开关置于预热挡，电热丝电路接通，阀体受热伸长使阀芯下移，将油孔打开，燃油从阀体下端气化喷出，遇电热丝形成火焰，加热进入汽缸的空气。为了使火焰稳定，提高加热效果，预热系统配有稳焰罩。该预热器也是靠外壳螺纹拧装在汽缸盖上的燃烧室或进气歧管上的，加热快。

5.2.5 其他预热器

电磁式火焰预热器装在发动机的进气歧管上，其结构如图 1.5-94 所示。预热器不工作时预热器内的阀体靠弹簧张力将阀门紧压在阀座孔上使其封闭。

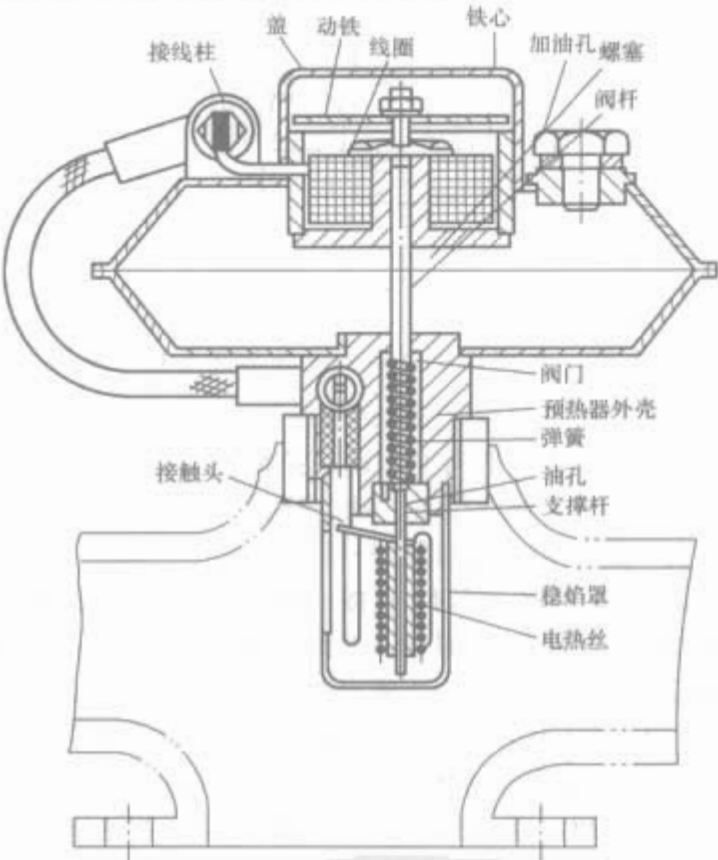


图 1.5-94 电磁火焰预热器结构示意图

5.3 晶体管电动燃油泵

为了克服机械式燃油泵易产生气阻的缺点，在现代汽车上已开始普遍使用晶体管电动燃油泵。

5.3.1 特点

晶体管燃油泵以电能为动力进行泵油，它具有以下特点：

- (1) 可以安装在通风良好、温度较低的适当位置，能有效地避免“气阻”现象。
- (2) 汽车下坡时，可以适当关闭油泵，有利于节省燃油。
- (3) 通用性强，进口汽车如无原型号机械油泵配件可换时，均可换用此类晶体管油泵。
- (4) 发动机易起动，尤其是对于停置时间较久、化油器

无油的汽车能较快地起动。

5.3.2 组成

晶体管电动燃油泵主要由机械泵油部分和晶体管控制部分组成。

5.3.3 机械油泵部分

机械泵油部分实际上就是一种油泵。它有多种结构，图 1.5-95 所示为一种典型的燃油泵结构，主要由泵芯、铁心、壳体、半导体组件、滤网等五大部分组成。

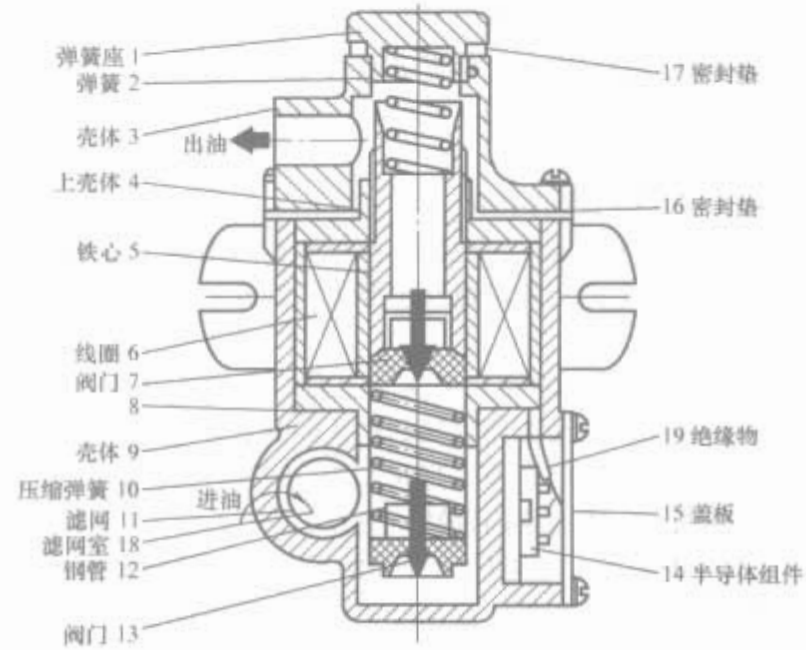


图 1.5-95 典型的燃油泵结构示意图

当线圈 6 通电时，铁心 5 被吸下，压缩弹簧 10 使阀门 13 关闭、阀门 7 打开。当线圈 6 断电时，铁心 5 在弹簧 10 作用下返回初始位置。与此同时，阀门 7 关闭，阀门 13 打开，于是燃油从进油管被吸入滤网室 18；流过滤网 11，经阀门 13 进入铁心下端的铜管 12 内。当线圈再次通电，铁心又向下运动时，阀门 13 又关闭，阀门 7 又打开，铁心下端铜管内的燃油被挤入阀门 7 上端的空腔中。当线圈再断电时，铁心在弹簧 10 作用下向上运动，阀门 7 关闭，阀门 13 打开，铁心上部空腔内的燃油被泵入输油管；同时，铁心下端内又有燃油进入。这样，铁心不断往复运动，完成泵油工作的循环。

5.3.4 晶体管控制部分

晶体管控制部分实际上是一种分立元件组成的自激间歇振荡电路。该振荡电路以一只晶体管为主构成，这只晶体管既有 NPN 型又有 PNP 型。图 1.5-96 所示为几种常见的晶体管控制电路原理图。

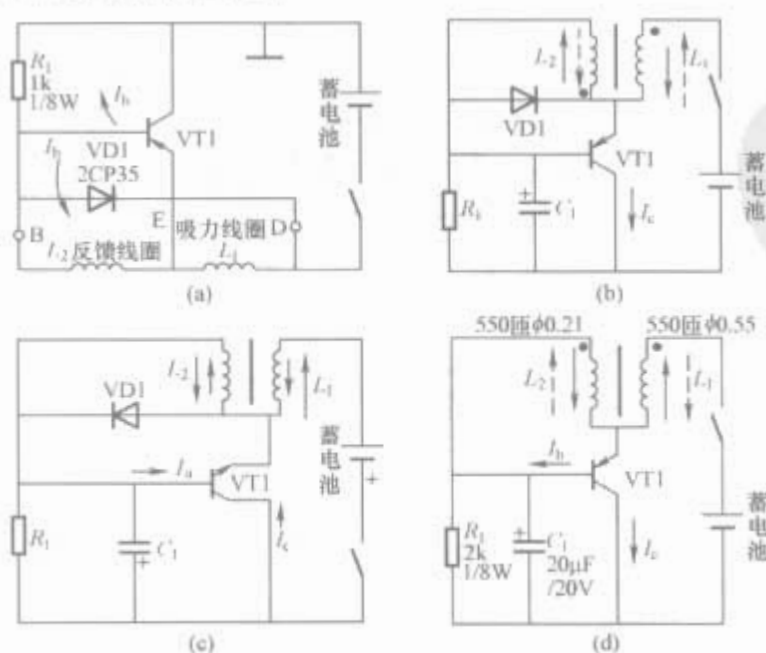


图 1.5-96 几种晶体管控制电路原理图
(a)、(b)、(d) PNP 管组成的控制电路；
(c) NPN 管组成的控制电路

5.3.4.1 NPN 管组成的控制电路原理

电路原理图如图 1.5-96 (c) 所示。它由主线圈 L_1 、副线圈 L_2 、三极管 VT1、电容器 C_1 、二极管 VD1 和电阻 R_1 组成。

(1) VT1 起动、饱和过程。当接通电源时，三极管 VT1 的基极和发射极之间有偏流 I_b 通过，因而在三极管集电极和线圈 L_1 中有电流 I_c 流过，于是在线圈 L_2 中产生感应电动势，其方向如实线箭头所示。 L_2 的感应电动势加在 VT1 的 b、e 极之间，产生正反馈，使 VT1 的基极电位上升，基极电流 I_b 增大，进一步促使 VT1 集电极 I_c 增大，以至饱和。

(2) VT1 饱和、截止过程。当三极管 VT1 饱和导通以后， I_c 不再增加，线圈 L_1 和 L_2 的电动势下降为零，于是基极电位下降，进一步导致 I_c 减小，线圈 L_1 和 L_2 中又产生反向电动势，而线圈 L_2 的感应电动势使基极电位更低， I_c 电流更小，直至截止。

(3) VT1 截止、导通过程。在 VT1 管集电极电流 I_c 减小的过程中，线圈 L_1 、 L_2 的感应电动势向电容器 C_1 充电。接着电容量 C_1 储存的电荷通过 R_1 放电，于是电容器 C_1 端电压下降，VT1 基极电位上升。当基极电位高于发射极电位一定数值时，VT1 重又导通，重复进行上述过程。这样，通过线圈 L_1 中的电流及其所产生的磁场以 1000r/min 的频率进行交变，调整 R_1 、 C_1 的数值可改变其频率的大小。二极管 VD1 的作用是当三极管 VT1 截止、电流突然变化时，使线圈 L_2 所产生的感应电动势构成回路，以免击穿 VT1 管。

(4) 泵油过程。当 VT1 管导通时，线圈 L_1 中的电流最大，它所产生的磁力吸引机油泵中的柱塞，使吸油阀关闭，排油阀顶开，将进入两阀间泵筒中的汽油经排油泵压入泵上塞的出油管。当 VT1 管截止时，线圈 L_1 不通电，电磁吸力消失，柱塞在回位弹簧的作用下，向上运动。这时排油阀关闭，吸油阀打开，汽油从下部沉淀杯被吸入两阀间的泵筒中。由于控制电路不断地交变，柱塞也不断地往复运动，使燃油不断地从油箱通过油管进入沉淀杯，再经过滤网、泵上室送至化油器。当发动机怠速或部分负荷用油较少时，由于排油阀排出的油量不变，致使燃油因过剩而压力增高，当压力达到一定数值时，就会顶开回油阀，使多余的汽油流回油杯。

5.3.4.2 PNP 管组成的控制电路原理

PNP 管组成的控制电路如图 1.5-96 (a)、(b)、(d) 所示，它由一只大功率三极管 VT1、一只 1kΩ 电阻 R_1 、一只 2CP35 二极管 VD1 和吸力线圈 L_1 、反馈线圈 L_2 等组成。VT1、VD1 和 R_1 在制造时已经制成组件，成为一密封整体，外部只有 e、b、d 三个引出脚，分别与泵芯两组线圈的三个引出线 E、B、D 相连，组件的外壳是 VT1 管的集电极。

(1) VT1 起动、饱和过程。当电路接通电源后，三极管 VT1 由电阻 R_1 获得发射结正向电压，产生基极电流，VT1 管导通，其发射极电流流经线圈 L_1 。使线圈 L_1 产生磁通，该磁通使在同轴绕制的反馈线圈 L_2 中产生感应电动势。由于 L_2 在制作时已按正反馈的方式连接好，故其感应电动势的方向为 E 点为正、B 点为负，此感应电动势使 VT1 管发射结的正向电压增大，其集电极电流变大，于是线圈 L_1 吸引铁心的吸力增强，使铁心向下运动。

(2) VT1 饱和、截止过程。当 VT1 管集电极电流增大到一定程度以后，铁心线圈的磁通也达到饱和，其磁通不再变化，反馈线圈 L_2 内的感应电动势也随之变为零，VT1 管

基极电流及吸力线圈 L_1 的电流都开始减小。这样，在反馈线圈 L_2 中又重新感应出电动势，但该电动势的极性与前次相反，即 E 点为负、B 点为正，使 VT1 管发射结得到反向电压，VT1 迅速截止。油泵铁心在弹簧弹力的作用下，迅速退回到初始位置。

(3) VT1 截止、导通过程。当上述线圈磁通减为零、反向电压消失时，VT1 管在电阻 R_1 的作用下产生的正向电压仍然存在，又使 VT1 管再次导通。

上述过程周而复始，油泵铁心不断地作往复运动，从而完成了泵油过程。

晶体管油泵在汽车滤清器良好、发电机电压正常的条件下，可连续使用 3 万 km 左右不用维修。调整弹簧的弹力可使出油压力增大或减小，但弹簧的弹力不允许随便乱调。

另外，停车后要及时断开晶体管油泵电源，否则，其长期工作下去会导致 VT1 散热不良而损坏。

5.4 汽车防盗系统

5.4.1 概述

汽车防盗系统是指防止汽车本身或车上的物品被盗所设的系统。它由电子控制的遥控器或钥匙、电子控制电路、报警装置和执行机构等组成。

为了更好的发挥防盗作用，有的车上还装有一个转向锁，转向锁是用来锁止汽车转向轴的。转向锁与点火锁设在一起，安装在转向盘下，它是用钥匙来控制。即点火锁切断点火电路使发动机熄火后，将点火钥匙再左旋至极限位置的挡位，锁舌就会伸出嵌入转向轴槽内，将汽车转向轴机械性的锁止。即使有人将车门非法打开并起动发动机，由于转向盘被锁止，汽车不能实现转向，故不能将汽车开走，于是起到了汽车的防盗作用。有的汽车设计和制造时就没有转向锁，而是用另外一个所谓的拐杖锁锁止转向盘，使转向盘不能转动，也可起到防盗作用。

有的汽车在变速器上设有机锁，是将变速器操纵杆锁止，使盗窃者不能挂挡而使汽车不能移动。

点火开关是用来接通或断开发动机点火系的电路，根据一把钥匙开一把锁的道理，也起到了一定的防盗作用。

5.4.2 系统分类

由于汽车技术不断发展，近年来多数轿车上都安装了中央门锁，即汽车上的车门门锁和行李箱锁实现了集中控制。

随着电子技术的发展，在原有中央门锁的基础上，又发展到现在的电子门锁、微机控制的带自动报警的防盗系统、电子密码点火（钥匙）锁等，使汽车门锁实现了电子控制。

汽车防盗装置按其发展过程可分为机械锁防盗装置、机电式防盗装置和电子防盗装置三个阶段。

5.4.3 机械锁防盗装置

机械防盗锁是靠其坚固的金属材质，来锁止汽车的操纵装置（如转向盘、变速器操纵杆等）或车门。其主要存在问题是门锁的锁筒容易被开启或被撬；被锁汽车操纵装置（如变速杆等）的材料一般强度较低容易破坏；机械防盗锁使用也不方便，同时防盗不可靠。其优点是制造简单、费用低廉。

机械门锁种类繁多，其作用和家门锁的作用相同。货车或吉普车的门锁结构与家门的门锁大致相同，即多是由锁体、锁筒和按钮等组成。小轿车车门的机械锁与家门锁有所不同之处是，将锁舌变为锁扣式或带棘轮棘爪齿轮式。

5.4.4 机电式防盗装置

机械门锁虽说有造价低等优点，但是由于它的防盗作用

很差，已趋于淘汰。随着科学的进步，出现了机电一体式的防盗装置（中央门锁）。

中央门锁是以电来控制门锁的开启或锁止，并由驾驶员集中控制所有车门门锁的锁止或开启。中央门锁系统具有下列功能：

(1) 将驾驶员车门锁扣按下时，其他几个车门及行李仓门都能自动锁定；如用钥匙锁也可同时锁好其他车门和行李仓门。

(2) 将驾驶员车门锁扣拉起时，其他几个车门及行李仓门锁扣都能同时打开；用钥匙开也可实现该动作。

(3) 在车室内个别车门需打开时，可分别拉开各自的锁扣。

5.4.4.1 中央门锁的组成

中央门锁主要由控制电路和执行机构等组成。

(1) 控制电路。控制电路主要由门锁开关、定时装置和继电器等组成。

1) 门锁开关。门锁开关实质上是一个电门开关，它是用来控制各车门和行李箱锁筒的锁止和开启。用钥匙来拨动门锁锁芯转过一定的角度，即可接通门锁执行机构的电路，使电磁线圈产生吸力将门锁锁止或开启。

2) 定时装置。接通门锁开关的时间与电动机锁止门锁所需的时间不可能相等，往往开关接通电路时间较长，因此多会使执行机构过载而损坏门锁的机械传动装置或电气设备。于是在此电路中根据其特点设有定时装置，来设定门锁的锁止或开启所需的时间，以防止执行机构过载。定时装置的基本原理是利用电容器的充放电特性，来控制执行机构的通电时间，使执行机构锁止或开启，电容器的电恰好放完，继电器的电流中断而丧失吸力则触点断开。

3) 继电器。在定时装置的控制作用下，接通或断开执行机构的电路。

(2) 中央门锁执行机构。中央门锁执行机构的作用是执行驾驶员的指令，将门锁锁止或开启。门锁执行机构常见的有电磁线圈式、电动机式和永磁型电动机式。

1) 电磁线圈式。如图 1.5-97 所示，电磁线圈通电后产生电磁力吸动引铁轴向移动，引铁通过连接杆将门锁锁扣锁止。一般电磁线圈式执行机构有两个电磁线圈，其绕制方向相反，以便改变电流方向使执行机构进行开启或锁止。电磁线圈式执行机构优点是故障少，使用寿命长，同时还减少了维修费用。缺点是该机构耗电量大。

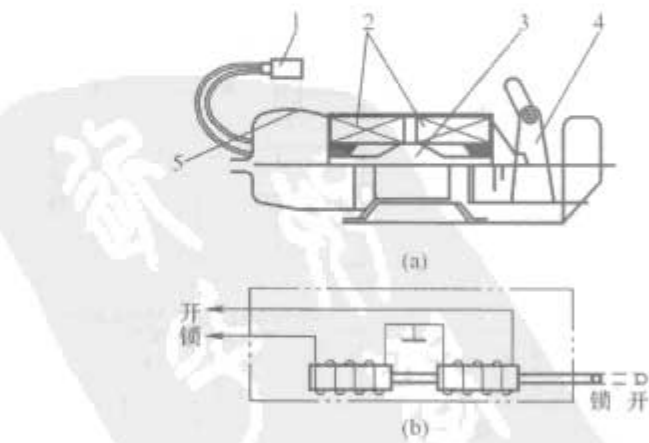


图 1.5-97 电磁式门锁执行机构图
(a) 结构；(b) 电路

1—电源插头；2—电磁线圈；3—铁心；4—托架；5—外壳

2) 电动机式。电动机式执行机构（也称为回转式执行机构）的作用与电磁线圈式相同，如图 1.5-98 所示。它是通过电动机转动并经传动装置（传动装置有螺杆传动、齿条

传动和直齿轮传动) 将动力传给门锁锁扣, 使门锁锁扣开启或锁止。由于电动机能双向转动, 所以通过电动机的正、反转实现门锁的锁止或开启。

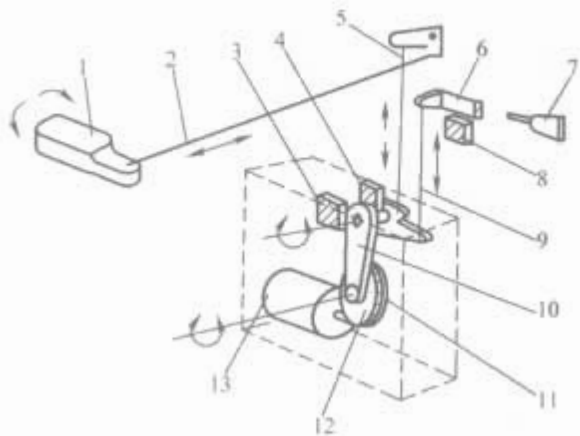


图 1.5-98 电动机式门锁执行机构示意图

1—车门按钮; 2, 5, 9—连接杆; 3—位置开关;
4, 8—门锁开关; 6—门键筒体; 7—门键; 10—锁杆;
11—齿条; 12—传动齿轮; 13—电动机

这种执行机构与电磁式执行机构相比, 耗电量较小。虽然电动机式执行机构电路中设有定时装置和断路器, 但设定的时间与实际的门锁开启或锁止时所需的时间不一定相等; 虽然电路中设有断路器, 但断路器需要有一定的加热时间, 故短路灵敏度较差, 于是常见有传动齿轮轮齿折断的现象等。

3) 永磁型电动机式。永磁型电动机多是指永磁型步进电动机。它的作用与前述相同, 但结构差异较大。转子带有凸齿, 凸齿与定子磁极径向间隙小而磁通量大。定子上带有轴向均布的多个电磁极, 而每个电磁极上的电磁线圈按径向布置。定子周布铁心, 每个铁心上绕有线圈, 当电流通过某一相位的线圈时, 该线圈的铁心产生吸力吸动转子上的凸齿对推定子线圈的磁极, 转子将转动到最小的磁通处, 即是步进位置。要使转子继续转动一个步进角, 根据需要的转动方向向下一个相位的定子线圈输入一个脉冲电流, 转子即可转动。转子转动时, 通过连杆使门锁锁扣锁止。

5.4.4.2 中央门锁工作原理

控制电路如图 1.5-99 所示, L_1 、 L_2 分别为控制门锁开关的控制线圈, 其中 L_1 为关闭车门的控制线圈, L_2 为开启车门的控制线圈, 它们的存在实现了真正意义上的电子控制。

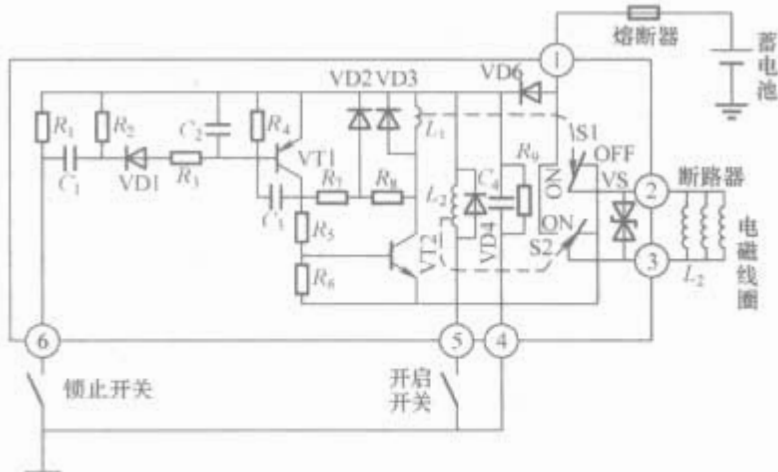


图 1.5-99 中央电动门锁电子控制电路图

ON—接通; OFF—截止

其工作过程如下:

(1) 锁止车门。当将钥匙插入锁筒内并旋转一定的角度后车门门锁开关接通控制电路, 通过一系列的控制使继电器 L_1 的电磁线圈通电, 吸合 $S1$ 触点, 使门锁电动机的电路导

通并构成闭合回路, 电动机转动将门锁锁扣锁止。当接通车门锁止开关时, 其电流由蓄电池的正极—熔断器—二极管 $VD5$ —三极管 $VT1$ 发射极—电阻 R_3 —二极管 $VD1$ —电容器 C_1 —锁止开关—蓄电池的负极。 C_1 充电瞬间, $VT1$ 、 $VT2$ 导通, 继电器 L_1 线圈有电流通过而产生吸力将 $S1$ 触点吸到 ON 的位置。这时的电流由蓄电池的正极—熔断器— $S1$ —执行机构 (电动机)— $S2$ —蓄电池的负极。电动机有电流通过产生动力拉下车门锁扣杠杆, 锁止车门。当电容器 C_1 充电完毕时, 三极管 $VT1$ 无基极电流通过而截止, 三极管 $VT2$ 也随之截止, 继电器线圈 L_1 失电而吸力消失, 开关 $S1$ 断开, 电动机无电流通过也停止工作, 锁止车门结束。

(2) 打开车门。当驾驶员需要将门锁打开时, 可将钥匙插入门锁筒内并旋转一定角度, 车门锁开启开关闭合。这时, 蓄电池的电流由正极—熔断器—继电器 L_2 —开锁开启开关—蓄电池的负极。由于继电器 L_2 的线圈通电而产生吸力, 使 $S2$ 处于 ON (接通状态), 电动机产生动力, 由于通过电动机的电流方向与车门锁止时相反, 所以车门锁锁扣被拉起, 车门锁被打开。

5.4.4.3 带有车速感应式中央门锁

当汽车行驶速度超过规定速度时, 为确保行车安全以防发生意外, 有的中央门锁还受车速控制。它是在原中央门锁的基础上加设了车速控制电路, 车速控制开关设在车速表内。当汽车行驶速度高时, 车速传感器自动接通门锁锁止电路将门锁锁止, 这种靠车速控制的门锁称车速感应式门锁。

图 1.5-100 所示为车速感应式电磁中央门锁电路。该电路具有驾驶员手动锁上或打开所有车门和仅锁止或打开驾驶员侧车门的功能。

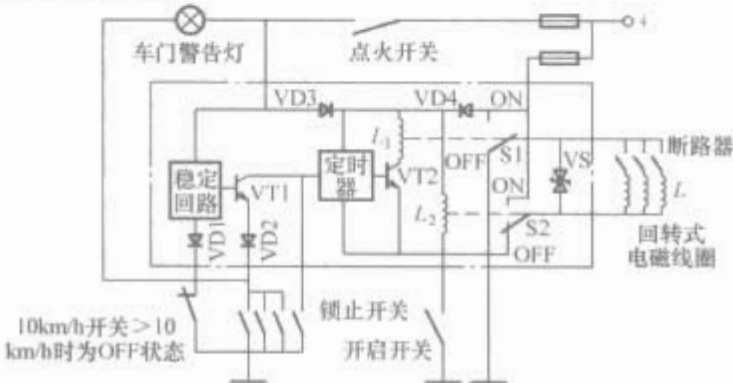


图 1.5-100 车速感应式中央门锁电路

$VT1$ 、 $VT2$ —三极管; L_1 —锁止继电器线圈; L_2 —开锁继电器线圈; $S1$ 、 $S2$ —继电器触点; L —回转型电磁线圈
ON—接通; OFF—截止

工作过程有两个状态, 即汽车停驶工作状态和汽车行驶工作状态。

(1) 汽车停驶工作状态。点火开关打开, 车速表内的 10km/h 车速开关 (舌簧管式开关) 处于接通位置, 蓄电池电流经熔断器、稳定回路、二极管 $VD1$ 、车速开关后搭铁。此时, 三极管 $VT1$ 截止、三极管 $VT2$ 也截止, 车门锁止继电器 L_1 断电, 车门处于开锁状态。此时只要有一个车门未锁止时, 该车门灯开关闭合, 车门报警灯亮, 提醒驾驶员注意。

(2) 汽车行驶工作状态。汽车行驶时, 当车速超过 10km/h, 车速表内的 10km/h 车速开关被移动的磁铁吸开, 三极管 $VT1$ 导通, 定时器经 $VT1$ 及门灯开关后搭铁, $VT2$ 导通, L_1 通电, $S1$ 处于 ON 位置, 回转型电磁线圈通电工作, 拉下车门锁扣杠杆, 车门被锁止。

5.4.5 电子式防盗系统

随着电子技术的发展, 在轿车上电子门锁应用也越来越

广泛。汽车电子防盗系统是在原有中央门锁的基础上加设了防盗系统的控制电路,在控制汽车移动的同时并报警。电子防盗是较理想的防盗装置,防盗系统不仅具有切断起动电路、点火电路、喷油电路、供油电路和变速电路,将制动锁止等功能,同时,还会发出不同的求救的声光信号,以阻止窃贼行窃。

总之电子防盗系统是具有报警,切断发动机点火电路、油路,控制制动和变速等功能的电子防盗系统。

5.4.5.1 电子防盗系统类型及选择

(1) 电子防盗系统类型。根据电子技术先进程度、汽车豪华程度和生产条件等的不同,防盗系统的种类繁多。按驾驶员控制方式分有钥匙式和遥控式。按防盗功能和防盗的程度的不同,防盗系统又可分为报警和防止汽车移动、卫星跟踪全球定位防盗系统等。

(2) 电子防盗系统类型的选择。

1) 钥匙控制式。通过用钥匙将门锁打开或锁止,同时将防盗系统解除或设置。

2) 遥控式。防盗系统能够远距离控制门锁打开或锁止,也就是远距离控制汽车防盗系统的解除或设置。

3) 报警式。防盗系统遇有汽车被盗窃时,只是报警但无防止汽车移动功能。

4) 具有防盗报警和防止车辆移动式的防盗系统。当遇有窃车时,除音响信号报警外,还要切断汽车的起动电路、点火电路或油路等,起到防止汽车移动的作用。

5) 电子跟踪防盗系统。该系统分为卫星定位跟踪系统(GPS)和利用对讲机通过中央控制中心定位监控系统。这些系统要构成网络,消除盲区,而且要有政府配合,公安部门设立监控中心。电子跟踪定位监控防盗系统是利用电波在波朗管地图上显示被盗车位置并向警方报警的追踪装置。设跟踪定位监控防盗系统,需有关单位专门设立这样一套机构和一套专用的设备,并需24h不间断地监视,否则,即使安装了电子跟踪定位监控防盗系统还是起不到防盗作用。

5.4.5.2 电控门锁的组成

汽车电控门锁通常是由控制部分和执行机构组成。

(1) 控制部分。控制部分包括输入器、存储器、识别器、编码器、驱动装置、抗干扰电路、显示装置、保险装置和电源等部分组成。

1) 电源用来向该系统提供电能。

2) 编码器用来人为的设置一定的密码。

3) 存储器可以将编码存储起来。

4) 输入器是用来将密码输入锁内。

5) 识别器是对来自输入器的编码和存储记忆的编码进行比较,当两组编码不相同,便会通过显示装置显示出来,或报警求救,或控制防止汽车移动装置执行指令,使汽车不能移动。

6) 驱动装置是在接到识别器输送来的信号时,接通执行机构的电路,使执行机构进行开启或锁止。

7) 抗干扰电路防止汽车内外电磁信号干扰所引起防盗系统误动作。

8) 显示器和报警器是输出装置,用来在需要报警时进行报警。

9) 保险装置的作用是防止车速过高时车门自动打开,在控制电路发生故障时,门锁可以直接开启。

(2) 执行机构。执行机构可以分为电动机式或电磁线圈式。它用来将电能转换为机械能,以使门锁开启或锁止。

5.4.5.3 钥匙控制式防盗系统

钥匙控制式防盗系统的作用是:当驾驶员将车门锁锁住

的同时,接通了电子防盗系统电路,从此电子防盗系统开始进入工作状态。一旦有窃贼非法打开车门,电子防盗系统一方面用喇叭报警求救;另外,切断点火系统电路,使发动机不能起动,于是起到了防盗报警的作用。

(1) 组成。这种防盗报警系统主要由电源、控制电路和执行部分等组成。

1) 电源的作用是向防盗系统提供电能。

2) 控制电路用来起动报警装置和控制发动机不能起动,以达到防盗的目的。

3) 执行部分主要由报警喇叭和切断点火电路的继电器等组成。

(2) 工作原理。如图1.5-101所示,当驾驶员锁住车门的同时,接通了控制电路中的S1开关,由于开关S1接通使其处于待工作状态,电源经喇叭继电器线圈将12V电压加在晶闸管阳极上,此时防盗报警系统处于值班状态。

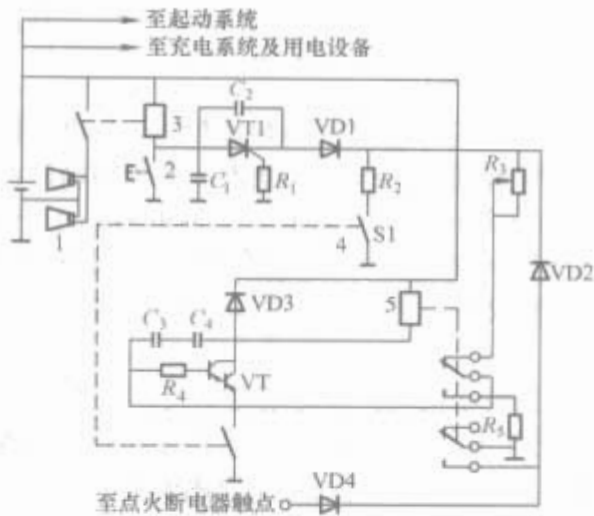


图 1.5-101 晶闸管电子控制防盗系统电路

当有窃贼非法打开车门进入车内时,如果接通某一低电阻电器设备电路时,其低电阻将产生一瞬间负的瞬变过程,这一负的峰值信号,使晶闸管阴极瞬间低于零电位,致使其触发极出现正电位。晶闸管被触发导通,电流经晶闸管—二极管VD1—电阻R2—开关S1—搭铁,构成闭合电路。

但由于电阻R2有足够高的阻值,通过喇叭继电器线圈3的电流小,所产生的电流强度不足以将继电器触点吸合,因而导通的晶闸管就使12V电压经电阻R3—继电器5动断触点—延时电路复合晶体管VT向电容器C3、C4充电,并通过复合晶体管的漏电流构成回路。

电阻R4是用来限制基极电流,当超过门限电压时,复合晶体管VT导通,使继电器5线圈电路构成闭合回路。继电器5线圈通电产生吸力,使其两个触点同时翻转与搭铁接通。上面的触点闭合后,延时电路的电容C3、C4通过电阻R5至搭铁放电。下面的触点闭合后导通了晶闸管至搭铁的电路,其电流由晶闸管—二极管VD1—二极管VD2—触点2—搭铁—蓄电池的负极。由于晶闸管至搭铁的电路中电阻甚小,则该电路中的电流增大,于是使喇叭继电器触点闭合,喇叭报警。与此同时,点火断电器的电路也导通,点火系的电路经二极管VD4—触点2—搭铁—蓄电池的负极,由于点火系的电路被短路,故发动机不能起动,这就起到了对汽车的防盗作用。

当电容器C3、C4放电低于晶体管VT的门限电压时而截止,继电器5线圈失电吸力消失,两触点断开,喇叭停止工作,同时点火系的电路也不被短路。至此,电容C3、C4又进行另一充电循环,在另一延时周期,继电器5的两个触点再次闭合,重复上述防盗过程,直至车主回来将S1开关

关断为止。

即使将喇叭的电路切断，但发动机还是不能起动，仍可起防盗作用。

5.4.5.4 带防止点火钥匙留在车内功能的电动机式电子门锁控制电路

图 1.5-102 是防止点火钥匙留在车内的电动机式电子门锁控制电路。门锁的开启和锁止是由电子控制器 (ECU) 控制门锁电动机进行正转与反转实现的。

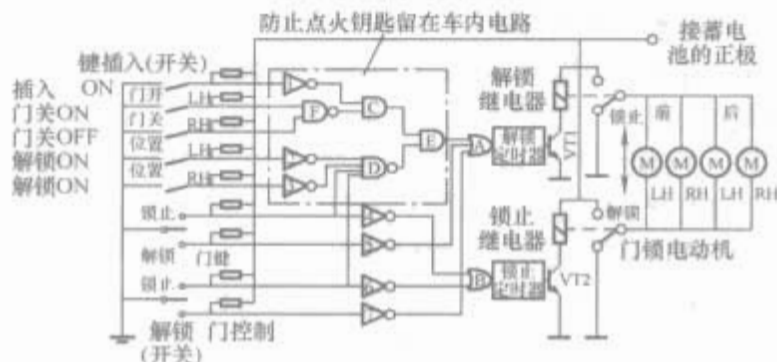


图 1.5-102 电子控制门锁电路图

如果驾驶员将点火开关钥匙忘记在车上而没有拔除,车门形不成锁止状态。如果点火开关钥匙仍插在点火开关锁筒内,接通了非门的电路,非门 1 输入端为 0 信号,其输出端为 1 信号;与非门 e 输入端与 LH 开关连通为 0 信号,RH 连通的为 1 信号,通过先与后非,其输出端变为 0 信号;与门 C 的输入端均为 0 信号,其输出端也为 0 信号;或门 A 获得与门 B 输送来的 0 信号,其输出也为 0 信号,故 VT1 截止,锁门电动机不工作车门不能锁止。

即使用另外的钥匙将车门锁止,即门锁开关与搭铁直接沟通,向与非门 D 输送 0 信号,门控制外关向与非门 D 输送的为 1 信号;与非门 D 的输入端获得的信号既有 0 也有 1,通过先与后非,其输出的为 1 信号;与门 B 的输入端获得与门 C 输送来的 0 信号和与非门 D 输送来的 0 信号,其输出为 0 信号;与门 A 获得 0 信号,其输出也为 0 信号,故三极管 VT1 仍截止,电动机仍不转动而不能锁止。

如果将点火开关钥匙抽出后,将钥匙插入门锁筒内,拨动锁心转动接通搭铁电路,非门 4 的输入端的信号为 0,其输出端为 1,或门 B 的输入端获得 1 信号,其输出也为 1 信号,则锁止定时器得到导通信号,三极管 VT2 有基极电流通过而导通,于是导通了锁止继电器的电路,其电流由蓄电池的正极—继电器线圈—三极管 VT2—搭铁—蓄电池的负极,构成闭合电路。锁止继电器通电将触点吸合,接通电动机的电路,其电流由蓄电池的正极—继电器触点—电动机—解锁继电器触点—搭铁—蓄电池的负极,构成闭合电路。电动机转动使门锁锁止。无论是用钥匙将门锁锁止或使用门控制将门锁锁止,其结果相同。

解锁时,将钥匙插入门锁锁筒内并拨动锁心转动,接通解锁搭铁电路,非门6的输入端获得0信号,其输出为1;或门A获得非门5输送来的1信号,其输出也为1信号,于是通过解锁定时器使三极管VT1有电流通过,从而导通了解锁继电器线圈的电路,其电流由蓄电池的正极—解锁继电器线圈—三极管VT1—搭铁—蓄电池的负极,构成闭合电路,其线圈通电而产生吸力并将触点吸合,沟通了门锁电动机的电路,其电流由蓄电池的正极—解锁继电器触点—电动机—锁止继电器触点—搭铁—蓄电池的负极,其电路闭合。由于通过电动机的电流方向与锁止时的方向相反,故电动机反转将门锁打开。

为避免门锁电动机通电时间过长而过热烧坏,通常利用

开启和锁止定时器限制其通电时间。

5.4.5.5 电子钥匙编码的防盗装置

电子钥匙编码控制装置是靠带编码的点火钥匙来控制汽车发动机的起动,以达到防止汽车被盗走的目的,其电路如图 1.5-103 所示。它主要由身份代码的点火钥匙、编码器构成的控制器和发动机控制单元等组成。带编码的点火钥匙中镶有电阻管心,在电阻管心内没有身份代码(电阻值)。

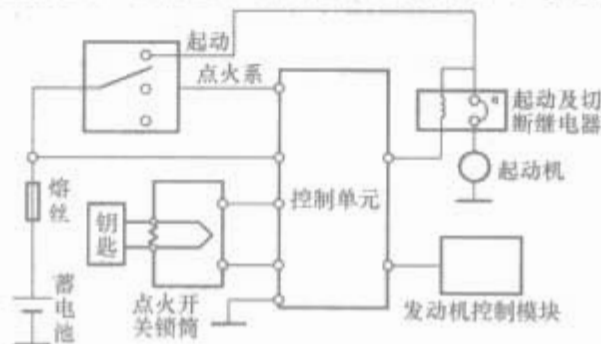


图 1.5-103 电子钥匙编码防盗系统

点火锁筒内存储有代码，当插入的钥匙与存储的代码不符，即电阻值不符合点火锁内存储的电阻值，则点火系的电路不能接通，从而起到了防盗作用。

用钥匙控制的汽车防盗系统与遥控汽车防盗系统相比较相对简单,但在夜间开或锁车门时,还需借灯光帮助,否则向门锁锁筒内插钥匙较困难。

5.4.5.6 遥控电子防盗系统

遥控电子防盗系统是利用发射和接收设备,并通过电磁波或红外线来对车门进行锁止或开启,也就是控制防盗系统进行防盗值班或解除。遥控电子防盗系统种类繁多,常见的有电磁波遥控电子防盗系统和红外线控制防盗系统。遥控电子防盗系统在夜间无需灯光帮助就能方便快捷的将门锁锁止或开启。

5.5 电动雨刷器及清洗装置

为了提高汽车在雨天和雪天行驶时驾驶员的能见度，专门设置了挡风玻璃刮水器，用于扫除挡风玻璃上的雨水、雪或泥土。刮水器有真空式、气动式和电动式三种，以电动式刮水器应用最广。

5.5.1 结构

电动刮水器由刮水电动机和一套传动机构组成，如图 1.5-104 所示。电动机 11 旋转时，通过蜗杆蜗轮减速，便与蜗轮上的偏心相连的拉杆 8 做往复运动，通过拉杆 7、3 和摆杆 2、4、6 带动左、右两刷架 1、5 作往复摆动，橡皮刷便刷去风窗玻璃上的污物。

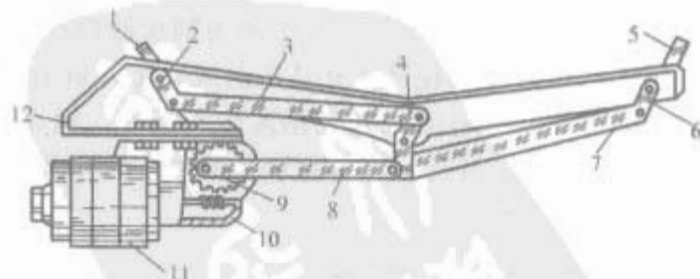


图 1.5-104 电动刮水器

1, 5—刮架; 2, 4, 6—摆杆; 3, 7, 8—拉杆;
9—蜗轮; 10—蜗杆; 11—电动机; 12—底板

刮水电动机现多用永磁式电动机，它的磁极为铁氧体永久磁铁。铁氧体具有陶瓷的脆性、硬性和不耐冲击的特点，但它具有体积小、重量轻、构造简单且价廉等优点，所以得到广泛应用。

5.5.2 控制原理

刮水电动机通常采用改变两电刷间串联的导体数的方法

对其进行调速，如图 1.5-105 所示。电刷 B3 为高、低速公用电刷。B1 用于低速，B2 用于高速，B2 与 B1 相差 60°。电枢采用对称叠绕式。

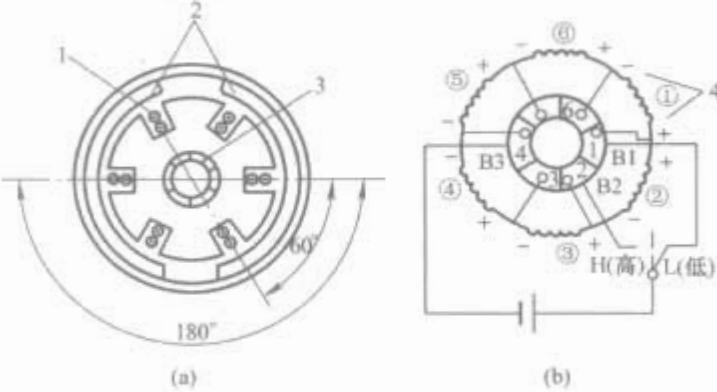


图 1.5-105 双速刮水电动机的工作原理
(a) 结构原理；(b) 电路原理

1—电枢绕组；2—水磁铁；3—换向器；4—反电动势

永磁式三刷电动机，是利用 3 个电刷来改变正、负电刷之间串联的线圈数实现变速的。其原理是：当直流电动机工作时，在电枢内同时产生反电动势，其方向与电枢电流的方向相反。如要使电枢旋转，外加电压必须克服反电动势的作用，即 $U > E$ ，当电枢转速上升时，反电动势也相应上升，只有当外加电压 U 几乎等于反电动势时，电枢的转速才趋于稳定。

无刷式电动机旋转时，电枢绕组所产生的反电动势如图 1.5-106 (a) 所示。当开关拨向“L”时，电源电压 U 在 B1 和 B3 之间。在电刷 B1 和 B3 之间有两条并联支路，一条是由线圈①、⑥、⑤串联起来的支路，另一条是线圈②、③、④串联起来的支路，即在电刷 B1、B3 间有两条支路，各 3 个线圈。这两个线圈产生的全部反电动势与电源电压平衡后，电动机便稳定旋转，由于有三个线圈串联的反电动势与 U 平衡，故转速较低。

当开关拨向“H”时，电源电压加在 B2 和 B3 之间，如图 1.5-105 (b) 所示。电枢绕组一条由 4 个线圈②、①、⑥、⑤串联，另一条由两个线圈③、④串联。其中线圈②的反电动势与线圈①、⑥、⑤的反电动势方向相反，互相抵消后，变为只有两个线圈的反电动势与电源电压平衡，因而只有转速升高使反电动势增大，才能得到新的平衡，故此时转速较高。可见，两电刷间的导体数减少，就会使电动机的转速升高。

另外，为了不影响驾驶员的视线，要求刮水器片自动复位，不管在什么时候切断电源，刮水器的橡皮刷都能自动停止在风窗玻璃的下部。图 1.5-106 所示为刮水器自动复位装置的示意图。在减速蜗轮 8 (由尼龙制成) 上，嵌有铜环，其中较大的一片 9 与电动机外壳相连接而搭铁，触点臂 3、5 用有弹性的磷铜片制成，其一端分别铆有触点与蜗轮端面或铜片接触。

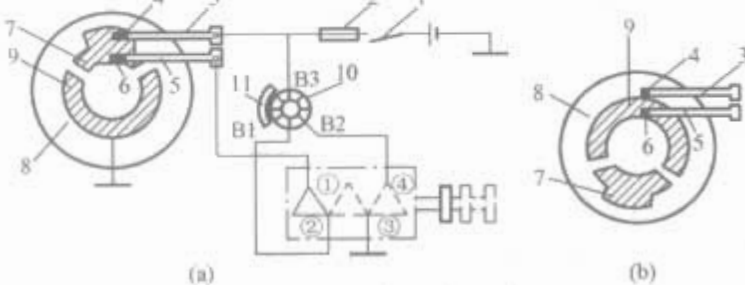


图 1.5-106 自动复位装置
(a) 电枢短路制动；(b) 雨刮电动机继续转动

1—开关；2—熔丝；3、5—触点臂；4、6—接触片；7、9—铜环；8—减速蜗轮

当电源开关 1 接通，把刮水器开关拉到“L”挡 (低速挡) 时，电流从蓄电池正极—开关 1—熔丝 2—电刷 B3—电枢绕组—电刷 B1—接线柱②—接触片—接线柱③—搭铁—蓄电池负极，形成回路，电动机以低速运转。

当刮水器开关拉到“H”挡时，电流从蓄电池正极—开关 1—熔丝 2—电刷 B3—电枢绕组—电刷 B2—接线柱④—接触片—接线柱③—搭铁—蓄电池负极，形成回路，电动机以高速运转。

当刮水器开关推到“0”挡 (停止) 时，如果刮水器橡皮刷没有停到规定位置时，由于触点与铜环 8 接触，则电流继续流入电枢，其电路为蓄电池正极—开关 1—熔丝 2—电刷 B3—电枢绕组—电刷 B1—接线柱②—接触片—接线柱①—触点臂 5—铜环 8—搭铁—蓄电池负极，形成回路，电动机以低速运转直至蜗轮旋转到图 1.5-106 (a) 所示的特定位置，电路中断。由于电枢的惯性，电动机不可能立即停止转动，电动机以发电机方式运行，因此时电枢绕组通过触点臂 3、5 与铜环 7 接通而短路，电枢绕组产生很大的反电动势，产生制动力矩、电动机迅速停止转动，使橡皮刷复位到风窗玻璃的下部。

5.5.3 电子式间歇雨刷器

汽车在毛毛细雨或雾天、小雪天气中行驶时，如按前述的刮水器速度 (哪怕最低速) 进行刮拭，那么风窗玻璃上的微量水分和灰尘就会形成一个发黏的覆盖层。因此，不仅不能将风窗玻璃刮拭干净，反而会使玻璃模糊不清，留下污斑，影响驾驶员的视线。因此，现代汽车上一般都增设了电子间歇控制系统。在碰到上述情况时，开动间歇开关，使刮水器按一定周期自动停止和刮拭，即每刮水一次停止 2~12s，这样可使驾驶员获得良好的视野。

5.5.3.1 无稳态方波发生器

图 1.5-107 所示为 VT1、VT2 组成无稳态多谐振荡器，其工作原理与闪光器相同。 R_1 、 C_1 决定 K 的通电吸合时间， R_1 、 C_2 决定 K 的断电时间，当雨刮开关在“0”挡为置时，刮水电动机电枢被 B1、B2 电刷、自停触点和继电器 K 的动断触点短路，电动机不转动。

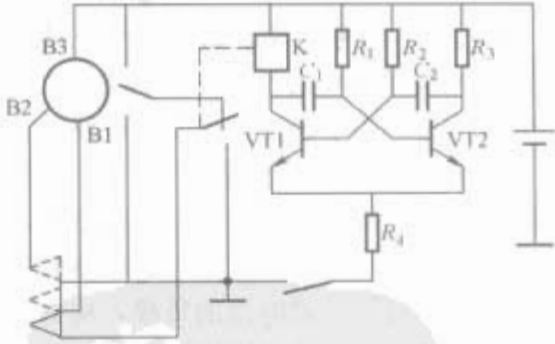


图 1.5-107 电子间歇刮水器

此时，若接通间歇开关，则 VT1 导通，VT2 截止，K 通电动作，动合触点闭合，此时刮水电动机低速运转。当 C_1 充电到一定值后，VT1 导通，VT2 迅速截止，K 断电，动断触点闭合，但此时自停触点通过铜环搭铁，刮水电动机继续运转，直到雨刮臂到达风窗玻璃下部自停触点上部闭合，电枢短路制动而停止。当 C_2 充电到 VT1 导通电压时，VT1 导通，VT2 截止，K 动作，动合触点闭合，又重复上述过程。

由上述可知，只要 VT1 导通时间足够长，刮水电动机转过自停位置后，即使 VT1 截止，雨刮电动机也会继续转动，使雨刮橡胶擦拭一次，调整 R_2 、 C_2 的值，则可调间歇时间。

5.5.3.2 互补间歇振荡电路

如图 1.5-108 所示,当刮水器开关置于断开位置(“0”挡),间歇开关置于接通位置时,电源便向 C 充电,动断触点打开,动合触点闭合,刮水电动机运转。此时的电路为蓄电池正极—B3—B1—刮水器开关—K 的常开触点—搭铁—蓄电池负极。当刮水电动机转动使自停触点与下边接触时,电容器 C 便通过 VD 迅速放电,此时刮水电动机仍继续运转。电容 C 放电,使 VT1 的基极电位降低,从而使 VT1、VT2 转为截止状态, K 中的电流中断,动断触点闭合。但由于这时自停触点与 VT1 接触,故刮水电动机仍继续转动,直到刮水橡皮刷摆回原位,自停触点接通为止,电动机才因电枢短路而停止。接着电源又通过自停触点向 C 充电,重复上述过程,使刮水器橡皮刷间歇动作,其停歇时间长短取决于 R_1 、C 的充电时间常数。并且由上述工作原理可知,这种电路保证每个停歇周期内,雨刷只摆动一次。

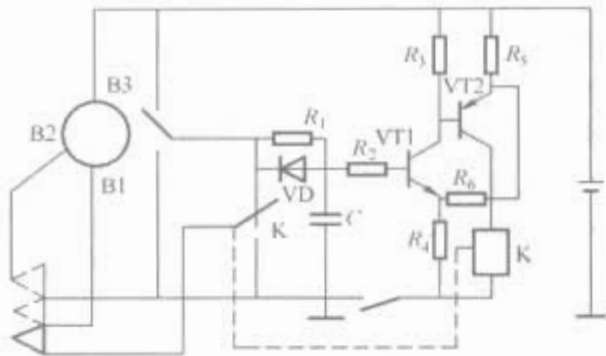


图 1.5-108 互补间歇振荡器

5.5.3.3 集成电路电子间歇振荡电路

图 1.5-109 所示为用 NE555 集成电路接成的振荡器,充电时间由 R_1 、 C_1 控制,放电时间由 R_2 、 C_1 控制,当间歇开关闭合时,电路输出高电位,继电器 K 得电,动合触点闭合,刮水电动机运转。经过一定时间后,电路翻转,3 端输出低电平, K 断电,动合触点断开,动断触点闭合,此时,刮水电动机继续运转,直至自停触点闭合雨水片停在原始位置。

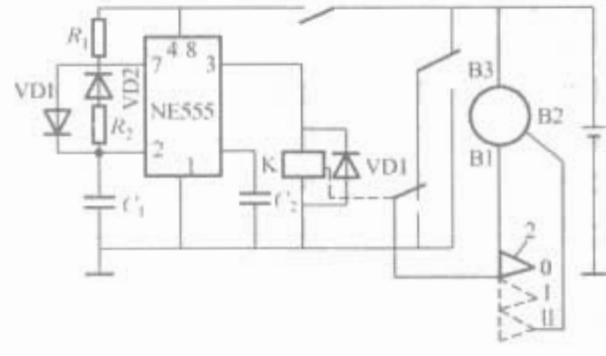


图 1.5-109 集成电路间歇振荡器

5.5.4 雨滴感知型刮水系统

电动刮水器虽然能够实现间歇控制,但不能够随雨量的变化及时调整雨刮的刮水频率。雨滴感知型刮水器则能根据雨量的大小自动调节刮水器刮水频率,使驾驶员始终保持良好的视线。

雨滴感知型刮水器主要由雨滴传感器、间歇刮水放大器和刮水器电动机组成,如图 1.5-110 所示。传感器的作用是将雨

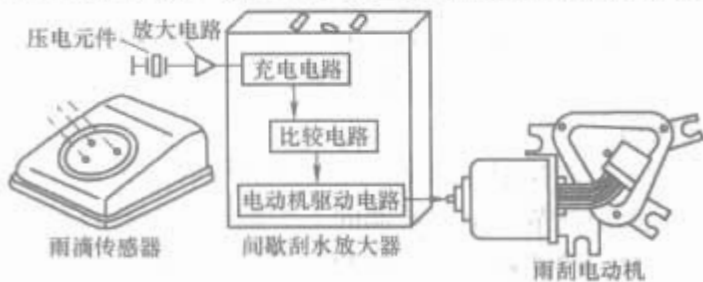


图 1.5-110 雨滴感知型刮水器

量的大小转变为与之相对应的电信号。雨滴感知型刮水器就把刮水器的间歇时间控制在 0~20s 内,以适应不同雨量的需要。

5.5.5 风窗清洗装置

为了消除附在风窗玻璃上的脏物,现代汽车上又增设了风窗玻璃洗涤器,并与刮水器配合工作,保持驾驶员的良好视线。

风窗玻璃洗涤器由洗涤液罐、电动泵、聚氯乙烯软管、刮水器开关、三通、喷嘴组成。电动泵由永磁直流电动机和离心式叶片泵组成一体,喷射压力为 70~88kPa。喷嘴安装在风窗玻璃下面,其喷嘴方向可以调整,使水喷射在风窗玻璃的适当位置。电动泵连续工作时间一般不超过 1min,且应先开动电动泵,后开动刮水器。在喷水停止后,刮水器应继续刮 3~5 次。这样配合使用才能达到良好的洗涤效果,所以洗涤器的电路,一般都是与刮水器开关联合工作的。

图 1.5-111 所示为汽车玻璃洗涤器和雨刷配合使用电路,当关闭刮水器时,开关 S3 在位置“0”挡,利水器的复位开关 S2 和继电器 K 的动断触点使 M2 电枢短路,这时电容器 C 经继电器线圈、VD3、 R_6 、 R_7 充电。玻璃洗涤器开关 S1 接通,电动泵 M1 起动,开始向风窗玻璃喷水。电容器 C 经电阻 R_7 和开关 S1 放电。当接通 S1 时,继电器 K 的绕组经二极管 VD4 和 S1 搭铁形成回路,继电器 K 动作,动合触点闭合。当打开刮水器路开关时, S3 处于“1”挡。继电器 K 绕组的电感引起一定的延时,电流流经继电器闭合触点和电阻 R_4 、 R_3 、 R_2 组成的分压器,使 VT1 导通,所以只有 S1 关闭时,电流才能流经继电器 K。当切断开关 S1 时,放电电容器经电阻 R_6 和 R_7 重新充电,当 C 的电压充到足够使 VT2 导通时, VT2 导通,这时在由 R_4 、 R_3 、 R_2 组成的分压器网络下部,经导通的 VT2 补充一个电阻 R_1 使 VT1 的基极电位低于门限值, VT1 截止,继电器 K 断电,刮水器电动机 M2 停止工作。由电容器 C 和电阻 R_6 及 R_7 组成的延迟网络决定切断电动机 M2 的延迟时间。二极管 VD1、VD2 和 VD3 起保护作用。

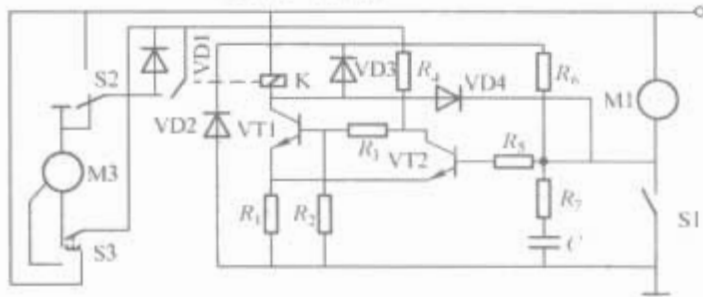


图 1.5-111 风窗玻璃洗涤器和电子雨刮器电路

5.6 汽车电动座椅、电动车窗及电动后视镜

5.6.1 电动座椅

汽车座椅的主要功能是为驾驶员提供便于操作、舒适而又安全的驾驶位置;为乘员提供不易疲劳、舒适而又安全的乘坐位置。它应满足以下要求:①座椅在车厢内的布置要合适,尤其是驾驶员的座椅,必须处于最佳的驾驶位置;②按人体工程学的要求,座椅必须具有良好的静态与动态舒适性,其外形必须符合人体生理功能,在不影响舒适性的前提下,力求美观大方;③座椅应采用最经济的结构,尽可能地减少质量;④座椅是支撑和保护人体的构件,必须十分安全可靠,应具有充分的强度、刚度与耐久性,对可调的座椅,要有可靠的锁止机构,以保证安全;⑤座椅应有良好的振动特性,能吸收从车厢地板传来的振动;⑥座椅应具有各种调节机构,为适应不同驾驶员、乘员在不同条件下获得最佳驾

驶位置与提高乘坐舒适性所不可缺少的手段。作为人和汽车之间联系部件的座椅，对其性能的要求越来越高，已从过去的固定式座椅发展到今天的多功能动力调节座椅。

5.6.1.1 普通电动座椅

普通电动座椅由若干个双向电动机转动装置及控制开关等部分组成。如图 1.5-112 所示，每个电动机可进行双向动作控制，电动机通电后，其输出动力经传动装置传至电动座椅，从而对座椅的不同位置进行调节。



图 1.5-112 普通电动座椅

电动座椅的电动机一般为永磁式直流电动机，其数量有单电动机驱动式，但多电动机驱动式居多。利用开关可控制流经电动机的电流方向，从而使电动机有两个转动方向，其控制电路如图 1.5-113 所示。

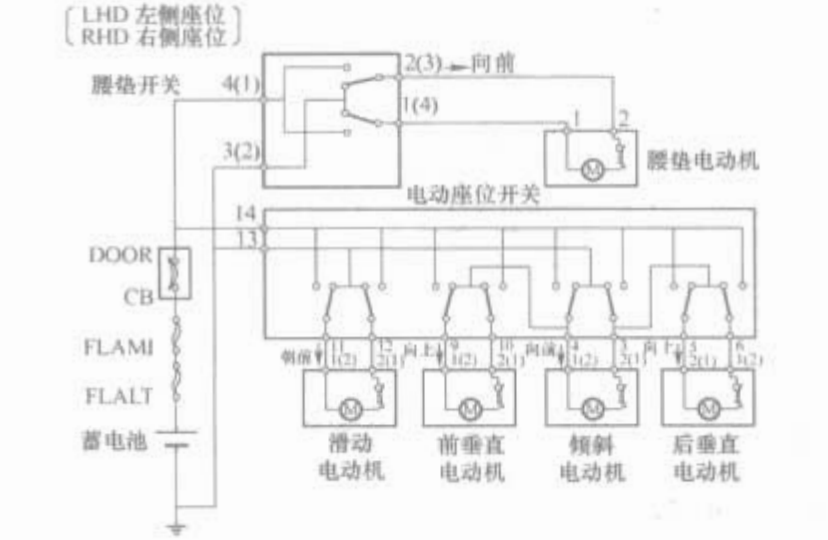


图 1.5-113 普通电动座椅控制电路图

如图 1.5-113 所示，该座椅共设置了滑动电动机、前垂直电动机、倾斜电动机、后垂直电动机及腰垫电动机，分别对座椅前后滑动、前部上下移动、靠背前后倾斜、后部上下移动及腰椎前后等十个方向进行调节。

如图 1.5-114 所示，当电动座椅开关置于前进位时，即图中 11 位端子置于左位，因而使滑动电动机正向通电，电动机正转，座椅向前滑动。其控制回路为：蓄电池正极—FLALT—FLAM1—DOOR CB—14 端子—11 端子—1（2）端子—滑动电动机—2（1）端子—12 端子—13 端子—搭铁—蓄电池负极。

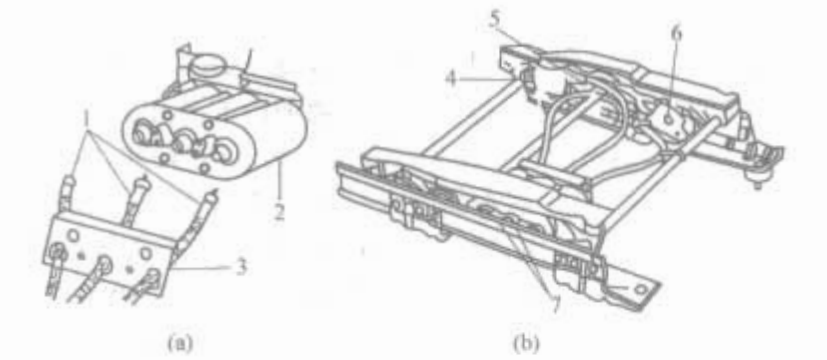


图 1.5-114 普通电动座椅的结构
(a) 电动机及电枢；(b) 传动机构

1—驱动软轴；2—电动机；3—托架；4—前变速器；
5—水平变速器；6—后变速器；7—电动机安装螺栓；

相反，12 位端子置于右位时，滑动电动机反向通电，电动机反转，座椅向后滑动。其控制回路为：蓄电池正极—FLALT—FLAM1—DOOR CB—14 端子—12 端子—2（1）端子—滑动电动机—1（2）端子—11 端子—13 端子—搭铁—蓄电池负极。

电动座椅的传动装置由变速器、联轴节、软轴、螺旋千斤顶及齿轮传动机构组成，如图 1.5-114 所示。图中一组电动机安装在托架上，电动机轴分别与不同的软轴相连，每个软轴与对应的变速器输入轴相连。变速器的作用是降速增距。各变速器输出轴分别与不同的蜗杆轴或齿轮轴相连，通过蜗轮蜗杆或齿轮条传动从而带动座椅支架产生位移，实现不同位置的调节。开关接通后，电动机动力经齿轮联轴节、软轴、变速器至螺旋千斤顶及齿轮传动机构，驱动座椅移动。当座椅到达行程终点时，软轴停止运动，此时若电动机仍在运转，其动力将被橡胶联轴节所吸收，以防电动机过载损坏。

5.6.1.2 自动汽车座椅

自动座椅是带存储功能的电动座椅，它是人体工程学与电子技术相结合的产物，它能自动适应不同体型的乘员乘坐舒适性的要求。

该座椅的调整装置除能改变座椅的前后、高低、靠背倾斜及头枕等的位置外，还能存储座椅位置的若干个数据（或信息），只要乘员一按按钮，就能调出各个座椅的位置，如果此时不符合存储数据（或信息）的乘员乘坐，汽车便发出蜂鸣声响信号，以示警告。这种应用微机控制的电动座椅出现于 20 世纪 80 年代，1983 年日本日产（NISSAN）和丰田（TOYOTA）公司分别在公爵牌和皇冠牌轿车上使用，现已在中高档轿车中大范围采用。

如图 1.5-115 所示，自动座椅的基本结构及驱动方式与普通电动座椅相似，不同之处是附加了一套电子控制系统。电子控制系统有两套控制装置，一套是手动的，它包括电动座椅开关、腰垫开关、腰垫电动机以及一组座椅位置调整电动机等，各人根据其需要，通过相应的座椅开关和腰垫开关来调整，此套控制方式与普通电动座椅完全相同；另一套是自动的，它包括一组位置传感器、储存和复位开关、ECU 及与手动系统共用的一组座椅位置调整电动机，如图 1.5-116 所示。此套装置可以根据位置传感器的信号将座椅位置储存起来，以备下次恢复座椅位置时使用。两套装置驾驶员可以根据不同需要，通过操纵储存于复位开关选择使用。

自动座椅的控制电路如图 1.5-116 所示，其动作方式有座椅前后滑动调节、座椅前部的上下调节、座椅后部的上下调节、靠背的倾斜调节、头枕的上下调节及腰垫的前后调节等。其中腰垫的前后调节是通过腰垫开关和腰垫电动机直接

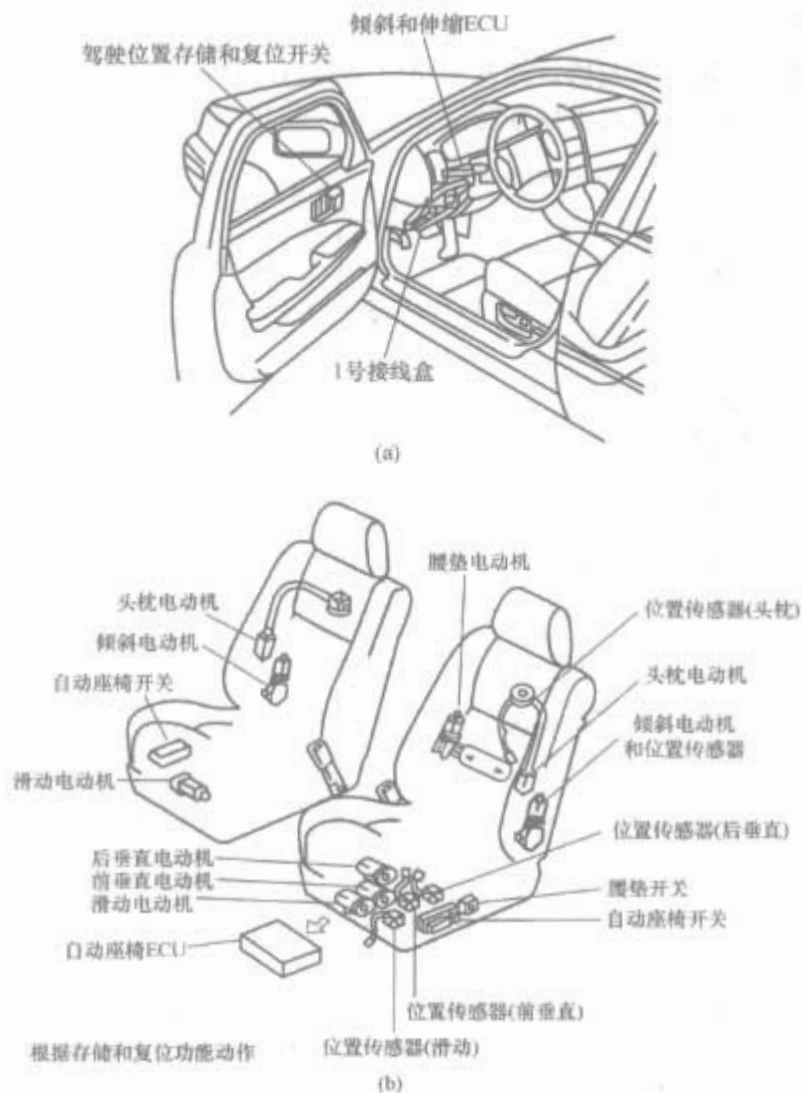


图 1.5-115 自动座椅控制装置在车上的布置

控制的，并无存储功能。驾驶员通过操纵电动座椅开关可以控制其余的 5 种调整。当座椅位置调好后，按下储存和复位开关，电控装置就把各位置传感器的信号储存起来，以备下次恢复座椅位置时再用，当下次使用时，只要一按位置储存和复位开关，座位 ECU 便驱动座椅电动机，将座椅调整到原来位置。

5.6.1.3 多功能自动座椅

汽车座椅调节装置的多功能化是指由座椅的前后、上下移动与靠背倾斜角的调节，逐渐向多功能发展，使座椅的舒适性、安全性、操纵方便性日益提高。图 1.5-117 所示即为具有 8 种功能的自动（调节）座椅。

如图 1.5-118 所示，自动座椅电子控制系统电路原理框

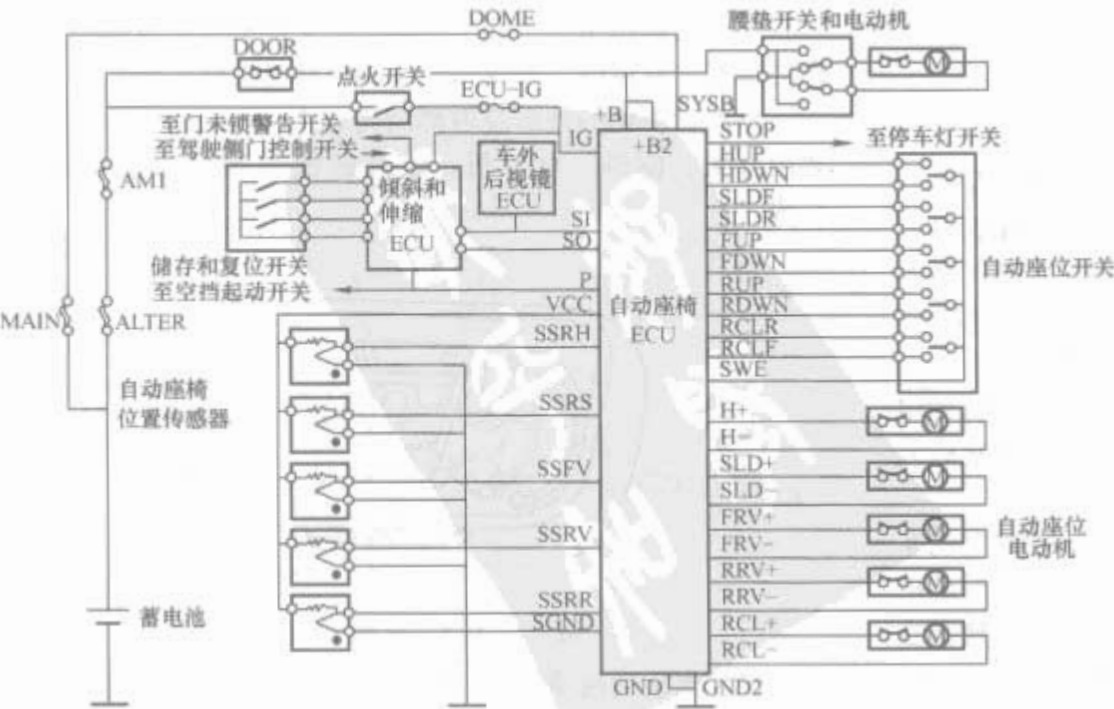


图 1.5-116 自动座椅控制电路图

图由座椅位置传感器、电子控制器 ECU 和执行机构的驱动电动机三大部分组成。位置传感器、后视镜位置传感器、安全带扣环传感器以及转向盘倾斜传感器等；ECU 包括输入接口、微机 CPU 和输出处理电路等；执行机构主要包括执行座椅调整、后视镜调整、安全带扣环以及转向盘倾斜调整等微电动机，而且这些电动机均可灵活地进行正、反转，以执行各种装置的调整功能。另外，该系统还备有手动开关，当手动操作此外关时，各驱动电动机电路也可接通，输出转矩而进行各种调整。

5.6.2 电动车窗

5.6.2.1 作用及基本组成

为了方便驾驶员和乘客，减轻他们的劳动强度，许多轿车采用了电动车窗，又称自动车窗利用电动机来驱动升降器（又称换向器）使车窗上下移动。

电动车窗系统主要由车窗、车窗升降器、电动机、继电器、开关等装置组成。

有些汽车上的电动车窗由电动机直接作用于升降器，而有些则是通过驱动机构作用于升降器，从而把电动机的转动变换为车窗的上下移动。电动车窗使用的电动机是双向的，有的为永磁型，有的为双绕组串励型。每个车窗都装有一个电动机，通过开关控制它的电流方向，使车窗玻璃上升或下降。

一般电动车窗系统都装有两套控制开关。一套装在仪表板或驾驶员侧车门扶手上，为主开关，它由驾驶员控制每个车窗的升降。另一套分别装在每一个乘客门上为分开关，可由乘客进行操纵。一般在主开关上还装有断路开关，如果它断开，分开关就不起作用。

5.6.2.2 基本工作原理

不同汽车所采用的电动车窗的控制电路不同，按电动机是否直接搭铁分为电动机不搭铁和电动机搭铁两种。

电动机不搭铁的控制电路是指电动机不直接搭铁，电动机的搭铁受开关控制，通过改变电动机的电流方向来改变电动机的转向，从而实现车窗的升降，控制电路如图 1.5-119 所示。

电动机搭铁的控制电路是指电动机一端直接搭铁，而电动机有两组磁场绕组，通过接通不同的磁场绕组，使电动机的转向不同，实现车窗的升降，控制电路如图 1.5-120 所示。



图 1.5-117 8 种功能的自动座椅
1—前后调节；2—靠背倾斜调节；3—上下调节；
4—头枕上下、前后调节；5—座椅前部调节；
6—侧背支撑调节；7—腰椎支撑气垫的调节

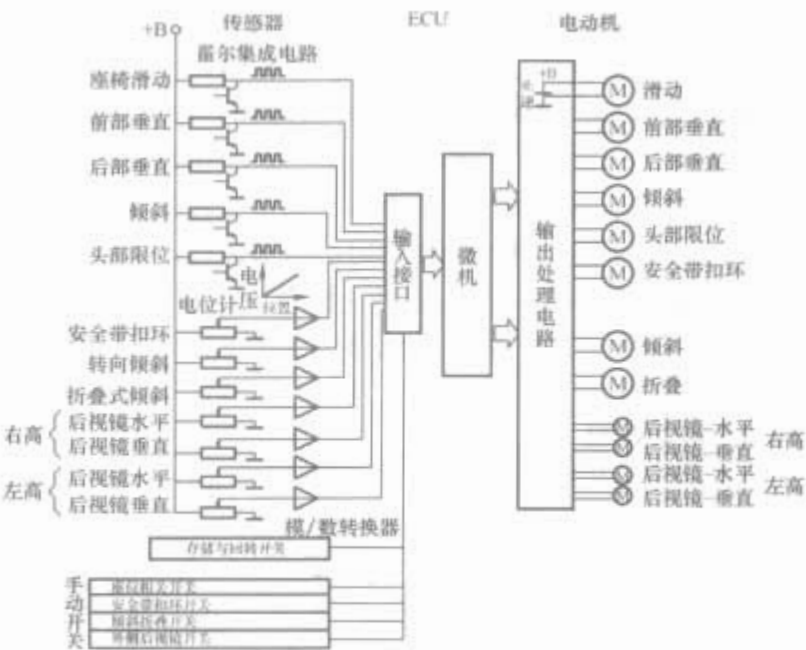


图 1.5-118 自动座椅电子控制系统电路原理框图

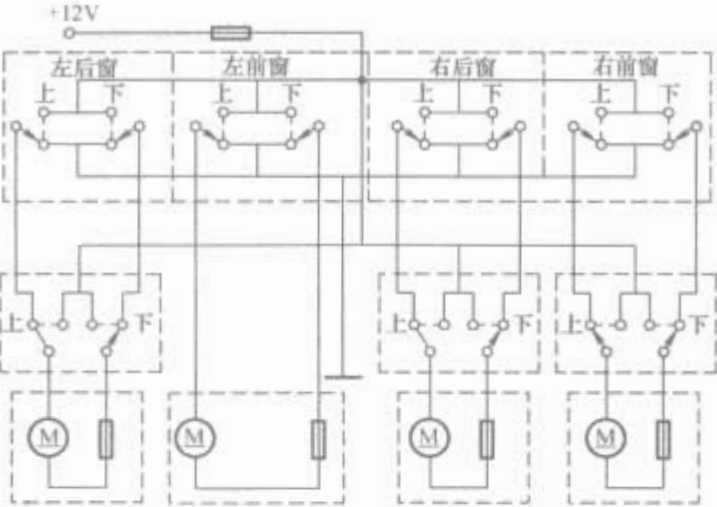


图 1.5-119 电动机不搭铁的电动车窗控制电路

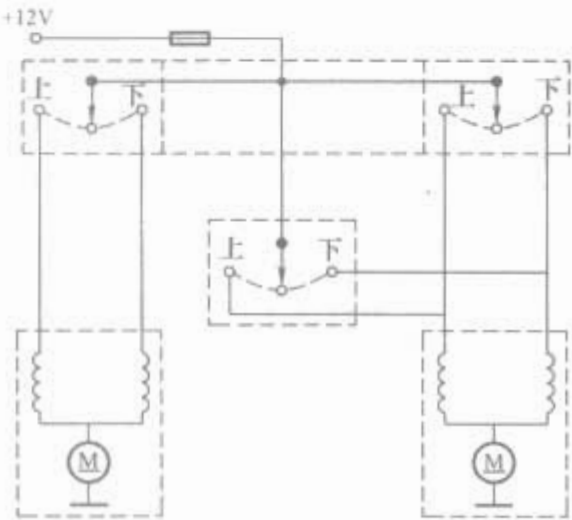


图 1.5-120 电动机搭铁的电动车窗控制电路

可见，电动车窗控制电路中，一般都设有驾驶员集中控制的主控开关和每一个车窗的独立操作开关，每个车窗的操作开关可由乘客自己操作。但是，有些汽车的主控开关备有安全开关，可以切断其他各车窗的电源，使每个车窗的操作开关不起作用，这个开关只能由驾驶员一人操作。

电动机不搭铁的控制方式，因为开关既控制电动机的电源线，又控制电动机的搭铁线，所以开关结构和线路比较复杂。但是电动机结构简单，应用比较广泛。

图 1.5-121 和图 1.5-122 所示为以电动机不搭铁电动车窗系统为例，驾驶员和乘客分别操作使右前车窗下降时的电流方向。驾驶员操作的主控开关中的右前车窗开关，使其在“下”的位置时，右前车窗电动机的一端通过主控开关与搭铁断开后接电源而通电转动，使右前车窗向下运动，电流方向如图 1.5-122 中箭头所指。乘客操作右前车窗的独立操作

开关，使其在“下”的位置时，右前车窗电动机的一端通过独立操作开关与搭铁断开后接电源而通电转动，使右前车窗向下运动，电流方向如图 1.5-122 中箭头所指。

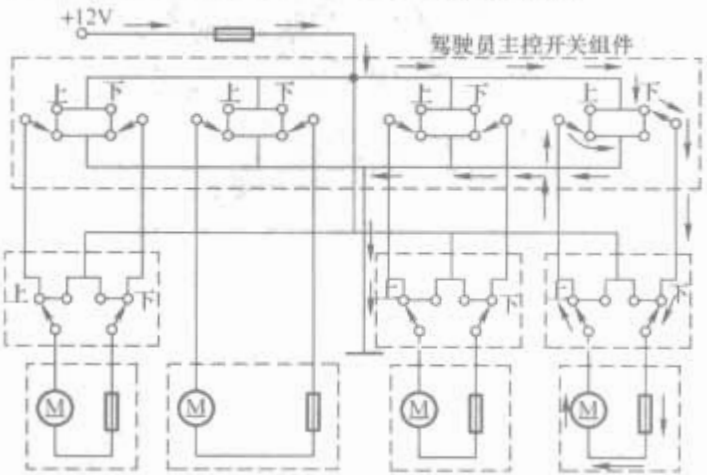


图 1.5-121 主控开关控制右前车窗下降

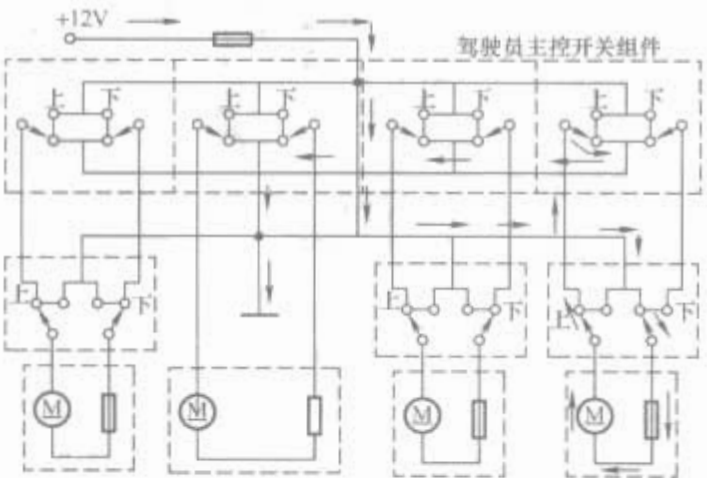


图 1.5-122 独立操作开关控制右前车窗下降

5.6.3 电动后视镜

汽车上的后视镜位置直接关系到驾驶员能否观察到车后的情况，与行车的安全性有着密切联系。后视镜俗称倒车镜，通常分为车外后视镜和车内后视镜两种。车外后视镜一般设在汽车左右的两侧，其作用是让驾驶员观察汽车左右的行人和上、下车的人员、车辆以及其他障碍物的情况，以确保行车和倒车安全。车内后视镜是供驾驶员观察车内乘员及物品的情况，车内后视镜应具有在夜间防止后续车辆的前照灯光线所引起防眩目的功能。而后视镜的调整一般来说比较麻烦，采用电动后视镜，可通过开关进行调整，操作起来十分方便。

5.6.3.1 车外后视镜基本结构及工作原理

车外后视镜由一个开关控制，开关能够控制后视镜多方向的运动，它可使一个或两个电动机同时工作。

车外后视镜的外形及内部结构如图 1.5-123 所示，它主要由开关、枢轴、电动机、永久磁铁和霍尔集成电路等组成。

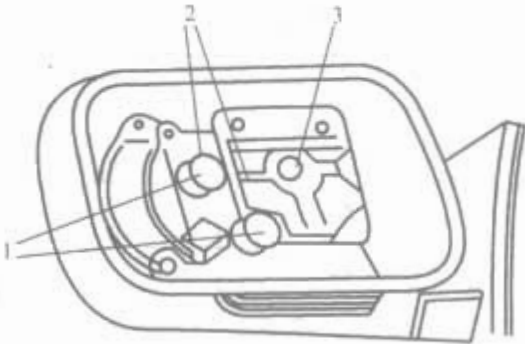


图 1.5-123 电动后视镜

(1) 电动后视镜开关。后视镜都由一个开关控制。开关杆能多方向运动，它可使一个电动机工作或两个电动机同时工作。

(2) 电动机及驱动装置。电动后视镜的背后设有两套电动机和驱动器，可操纵其上下左右运动。通常垂直方向的运动由一个电动机控制，水平方向运动由一个电动机操纵，电动机为永磁型。

(3) 枢轴。后视镜主要以枢轴为中心，通过两个微型电动机工作使后视镜上下或左右方向进行位置调节。

(4) 霍尔集成电路。霍尔集成电路产生模拟电压，对后视镜所在位置进行检测。

如图 1.5-124 所示，在进行调整时，首先通过左、右调整开关选择好要调的后视镜。如调右侧后视镜向上摆动，则先把开关拨到右边，按下控制开关按钮的上端或推向上边。此时电流的通路为：电源正极—点火开关—熔断器—按钮接线柱—B—V2—电动机 M3—C—E—搭铁—电源负极。这样电动机 M3 通电流产生转矩后，便带动右侧后视镜向上摆动。如果将通入电动机 M3 电流方向改变一下，M3 就会改变转动方向，此时即可使后视镜向下摆动。其他调整过程与上述调整过程类似，通过接通不同的开关即可实现。

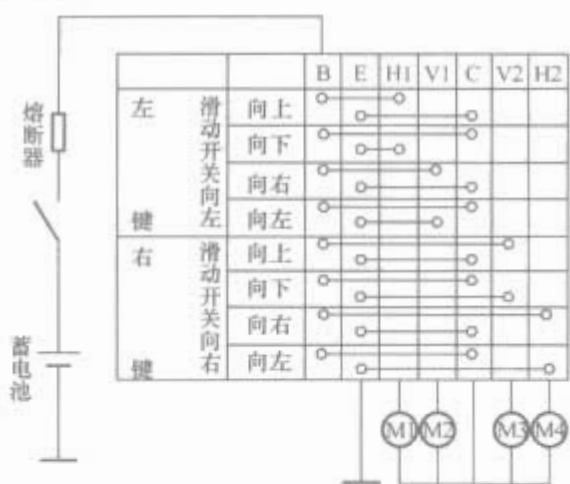


图 1.5-124 电动后视镜控制电路

有些汽车后视镜带有存储功能，即该后视镜控制系统装有驱动装置存储器、回复开关和位置传感器等，它可将后视镜的位置存储起来，需要时可以恢复到原来所调好的位置。

还有的汽车电动后视镜带有伸缩功能，由伸缩开关控制继电器动作，使伸缩电动机工作，则整个后视镜回转伸出或缩回。

5.6.3.2 车内后视镜

车内后视镜设在车内前挡风玻璃中上方，它用来供驾驶员观察车内乘员及物品的情况，也可以透过后窗观察车后的交通情况，以保证行车安全。当夜间行车时，车内后视镜会将入射的后继车辆前照灯灯光反射在驾驶员的眼睛内，引起驾驶员眩目而影响安全驾驶，于是现代有的汽车装有防眩目后视镜。

5.7 汽车电喇叭系统组成

5.7.1 作用与分类

汽车上都装有喇叭，用来警告行人和其他车辆，以引起注意，保证行车安全。喇叭按发音动力的不同分气喇叭和电喇叭两类；按外形分螺旋形、筒形、盆形三类（见图 1.5-125）；按声频分高音和低音两种；按接线方式分单线制和双线制两种。

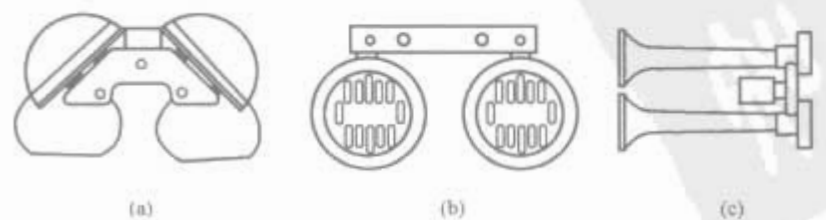


图 1.5-125 喇叭外形

(a) 螺旋形；(b) 盆形；(c) 电控气喇叭

气喇叭是利用气流冲击使金属膜片振动产生音响的，外形一般为长筒形，多用在具有空气制动装置的重型载货汽车上。电喇叭是利用电磁力使金属膜片振动产生音响，其声音悦耳，广泛使用于各种类型的汽车上。

电喇叭按有无触点可分为普通电喇叭和电子电喇叭。普通电喇叭主要是靠触点的闭合和断开，控制电磁线圈激励膜片振动而产生声音的；电子电喇叭中无触点，它是利用晶体管电路产生的脉冲激励膜片振动产生声音的。在中小型汽车上，由于安装的位置限制，多采用螺旋形和盆形电喇叭。盆形电喇叭有体积小、质量轻、指向好、噪声小等优点。

5.7.2 结构及工作原理

5.7.2.1 螺旋形电喇叭

螺旋形电喇叭的构造如图 1.5-126 所示。其主要机件有“山”形铁心、励磁线圈、衔铁、膜片、传声筒、触点以及电容器。膜片借中心杆与衔铁、调整螺母、锁紧螺母连成一体。

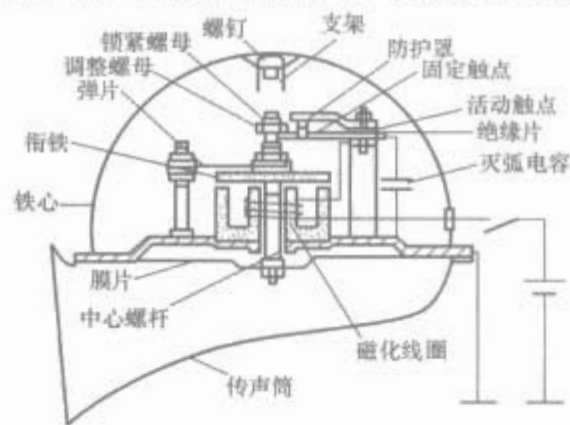


图 1.5-126 螺旋形电喇叭

当按下按钮时，电流由蓄电池正极—按钮—线圈—触点—搭铁—蓄电池负极。当电流通过线圈时，产生电磁吸力，吸下衔铁，中心杆上的调整螺母压下活动触点臂，使触点分开而切断电路。此时励磁线圈电流中断，电磁吸力消失，在弹簧片和膜片的弹力作用下，衔铁又返回原位，触点闭合，电路重又接通。此后，上述过程反复进行，膜片不断振动，从而发出一定频率的音波，由扬声筒共鸣后发出和谐悦耳的声音。为了减小触点张开时的火花，避免触点烧蚀，在触点间并联了灭弧电容。

5.7.2.2 盆形电喇叭

盆形电喇叭制作原理与螺旋形喇叭相同，其结构特点如图 1.5-127 所示。

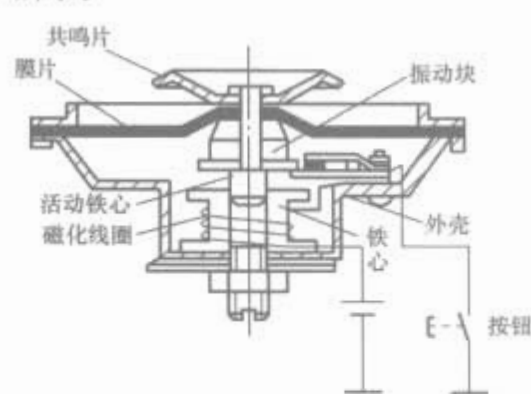


图 1.5-127 盆形电喇叭

电磁铁采用螺管式结构，铁心上绕有励磁线圈，上、下铁心间的气隙在线圈中间，所以能产生较大的吸力。它无传声筒，而是将上铁心、膜片和共鸣板装在中心轴上。当电路接通时，励磁线圈产生吸力，上铁心被吸下与下铁心撞击，产生较低的基本频率，并激励膜片及与膜片连成一体共鸣板产生共鸣，从而发出比基本频率强得多，且分布又比较集中的谐音。为了保护触点，盆形电喇叭在触点之间也并联了

一只灭弧电容器。

5.7.2.3 电动气喇叭

电动气喇叭主要由电动气泵和气喇叭两部分组成，如图 1.5-128 所示。按下喇叭按钮时，直流电动机气泵运转，产生了压缩空气；压缩空气直接通入气喇叭使喇叭发音。

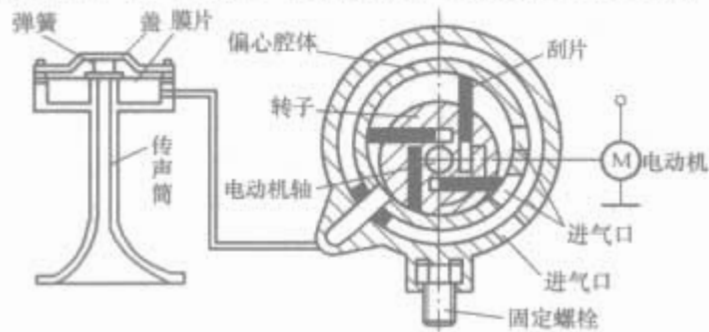


图 1.5-128 电动气喇叭

电动气泵属刮片式结构，气泵转子与电动机同轴。电动机带动转子旋转时，刮片在偏心腔体里旋转滑动，连续完成吸气排气的过程。

5.7.3 双音电喇叭控制电路

为了得到较为和谐悦耳的声音，在汽车上常装有两个不同音调（高、低音）的电喇叭。其中高音喇叭膜片厚、扬声筒短，低音喇叭则相反。

装用单只螺旋形电喇叭或装用两只盆形电喇叭时，电喇叭总电流较小（ $<8\text{A}$ ）。可以直接受转向盘上喇叭按钮控制。

当装用两只螺旋形电喇叭时，电喇叭耗用电流较大（ $>15\sim 20\text{A}$ ），用按钮直接控制，易烧蚀触点。为避免这个缺点，应采用继电器控制双音电喇叭。

喇叭继电器结构和接线如图 1.5-129 所示。按下转向盘上喇叭按钮时，蓄电池便经喇叭继电器线圈形成小电流，使继电器铁心产生电磁吸力，将继电器触点闭合，接通了双音电喇叭，喇叭发音。松开转向盘喇叭按钮时，继电器线圈断电，铁心电磁吸力消失，触点在自身弹力作用下张开，切断了电喇叭电路，电喇叭停止发音。喇叭继电器的作用就是利用铁心线圈的小电流控制触点的大电流，从而保护转向盘按钮触点。有些汽车为提高可靠性，双音盆形喇叭也采用了继电器控制电路。

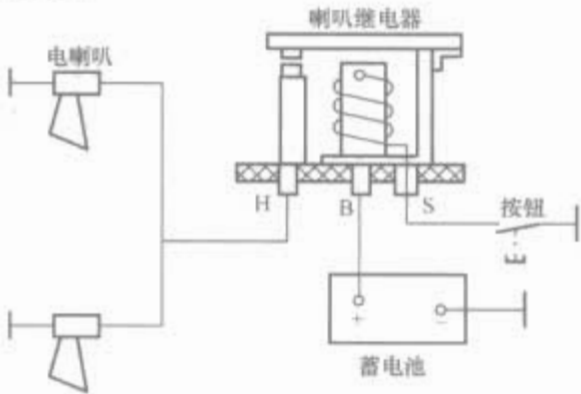


图 1.5-129 双音电喇叭继电器电路

第 6 章 汽车车上网络

汽车车上网络包括车内控制网络、车载信息网络及车载对外通信网络（或称车载无线网络）。本章阐述了目前主流的各种汽车车上网络，包括 CAN（控制器局域网）、LIN、SAE J1939、J1850、MOST、FlexRay、Byteflight、TTCAN，以及一些新兴的汽车网络控制概念，如线控技术等；重点介绍了应用广泛且十分具有代表性的 CAN 总线技术，并对适用于其应用、开发的 CAN 控制器和控制器接口进行了说明。考虑到各种网络在车上的实际应用情况，在本章的最后给出了几种典型的车上网络应用实例。

1 CAN 基本技术

CAN 技术规范包括 A 和 B 两部分。2.0A 给出了曾在 CAN 技术规范版本 1.2 中定义的 CAN 报文格式，而 2.0B 给出了标准的和扩展的两种报文格式。为了与 CAN 技术规范 2.0 兼容，要求 CAN 既与版本 2.0A 兼容，也与版本 2.0B 兼容。

1.1 CAN 技术规范 2.0A

1.1.1 CAN 节点的分层结构

控制器局域网（CAN）是一种具有很高保密性、有效支持分布式的实时控制的串行通信网络。CAN 的应用范围遍及从高速网络到低成本的多线路网络。在自动化电子领域、发动机控制部件、传感器、抗滑系统等应用中，CAN 的位速率可高达 1Mbit/s。同时，它可以廉价地用于交通运输载工具电气系统中，例如灯光聚束、电气窗口等，以替代所需要的硬接线。

CAN 技术规范的目的是使任意两个 CAN 执行过程达到兼容。然而，兼容性具有众多的不同方面，例如电气特性和被传送数据的表示方法。为使设计透明和执行灵活，CAN 划分为不同层次：CAN 对象层（Object Layer）、CAN 传送层（Transfer Layer）和物理层（Physical Layer）。对象层和传送层包含由 ISO/OSI 模型定义的数据链路层的所有服务和功能。CAN 节点的分层结构如图 1.6-1 所示。

对象层的范围包括：寻找将被发送的报文；确定由传送层接收的实际将被使用的报文；提供与硬件有关的应用层的接口；在定义对象处理时，存在许多灵活性。传送层的功能主要是传送协议，即控制成帧、执行仲裁、错误检测、错误标注和故障界定。在传送层中要判定总线是否开放，以便开始一次新的发送，或者是否立即开始接收。位定时的某些一般特性也被作为传送层的一部分，传送层特性不存在修改的灵活性。物理层的范围是具有关于全部电气特性的不同节点间

应用层
对象层
— 报文过滤
— 报文和状态处理
传送层
— 故障界定
— 错误检测和标注
— 报文确认
— 应答
— 仲裁
— 报文成帧
— 传送速率和定时
物理层
— 信号电平和位表示
— 传输媒体

图 1.6-1 CAN 节点的分层结构

的位的实际传送。自然，在一个网络内，物理层对于所有节点必须是相同的。然而，在选择物理层时存在很大的灵活性。

CAN2.0A 技术规范的范围是定义传送层和与 CAN 有关的外层。由图 1.6-1 可见，传送层把接收到的报文呈现给对象层，并接收来自对象层的报文以便发送。传送层负责位定时和同步、报文成帧、仲裁、应答、错误检测和标注以及故障界定，它是 CAN 协议的核心。对象层涉及报文过滤、报文和状态处理。物理层定义信号怎样被实际发送。在这部分技术规范中未定义物理层，以便允许的发送媒体和信号电平为其应用而进行优化。

1.1.2 CAN 的一些基本概念

(1) 报文（Messages）。总线上的信息以固定格式的不同而有限长度的报文发送。当总线开放时，任何连接的单元均可开始发送一个新报文。

(2) 信息路由（Information Routing）。在 CAN 系统中，一个 CAN 节点不使用有关系统配置的任何信息（例如站地址）。这里包含一些重要概念：

1) 系统灵活性（System Flexibility）。节点可添加到 CAN 网络上，而不要求任何节点的软件或硬件以及应用层有任何改变。

2) 报文路由（Message Routing）。一个报文的内容由一个标识符 ID 命名。ID 并不指明报文的目的是，但描述数据的含义，以便网络中的所有节点有可能借助报文过滤决定该数据是否由它们接收。

3) 多点传送（Multicast）。作为报文过滤概念的结果，任何数目的节点均可接收同一个报文，并且同时按该报文的要求作出响应。

4) 数据一致性（Data Consistency）。在 CAN 网络内，可以确保一个报文同时被所有节点或者没有节点接收。因此，系统的数据一致性是借助于多点传送概念和错误处理达到的。

(3) 位速率（Bit Rate）。CAN 的数据传输速度在不同系统中是不同的。然而，在一个给定系统中，位速率是唯一的，并且是固定的。

(4) 优先权（Priorities）。在总线访问期间，标识符 ID 为报文定义了一个静态的优先权。

(5) 远程数据请求（Remote Data Request）。通过发送一个远程帧，需要数据的节点可以请求另一个节点发送一个相应的数据帧，该数据帧和相应的远程帧以相同的标识符 ID 命名。

(6) 多主站（Multimaster）。当总线开放时，任何单元均可开始发送一个报文。具有要发送的最高优先权报文的单元赢得总线访问权。

(7) 仲裁（Arbitration）。当总线开放时，任何单元均可开始发送一个报文，若有两个或更多的单元同时开始发送报文，总线访问冲突借助标识符 ID 进行逐位仲裁来解决。这种仲裁机制可以使信息和时间均无损失。若具有相同标识符 ID 的一个数据帧和一个远程帧同时起动，数据帧优先于

远程帧。仲裁期间，每一个发送器都将发送的位电平与在总线上监视到的电平进行比较。若相同，则该单元可以继续发送。当发送一个“隐性”电平（Recessive Level）而监视到一个“显性”电平（Dominant Level）时，该单元丢失仲裁，并且必须退出而不再发送后续位。

(8) 安全性（Safety）。为获得尽可能高的数据传送安全性，在每个CAN节点中，均设有错误检测、标定和自检的强有力措施。为检测错误，采取的措施包括：监视（发送器对发送的位电平与总线上监视到的位电平进行比较）、循环冗余检验、位填充和报文格式检查。

错误检测机制具有下列特性：所有全局性错误均可被检测；发送器的所有局部错误均可被检测；一个报文中的多达5个随机分布错误均可被检测；一个报文中长度小于15的突发性错误均可被检测；一个报文中的任何奇数个错误均可被检测。对于未检出的已损报文的剩余错误概率小于报文出错率 4.7×10^{-11} 。

(9) 错误标注和恢复时间（Error Signaling and Recovery Time）。已损报文由检出错错误的任何节点进行标注，这样的报文将被丢弃，并自动进行重新发送。自检出错误至下一个报文开始发送的恢复时间，如果不存在新的错误，最多为29个位时间。

(10) 故障界定（Fault Confinement）。CAN节点有能力识别短暂扰动和永久性故障，故障节点将被关闭。

(11) 连接（Connections）。CAN串行通信链路是一条总线众多单元均可连接到该总线上。理论上，单元数目是无限的；实际上，单元总数受限于延迟时间和/或总线上的电气负载。

(12) 单通道（Single Channel）。总线是由传送数据位的单通道组成的。从数据中可获得重同步信息。在CAN技术规范中，实现这种通道的方法不固定，例如可以是单线（加接地线）、两条差分线、光纤等。

(13) 总线数值（Bus Values）。总线可以具有两种互补逻辑数值之一：显性电平或隐性电平。在“显性”和“隐性”位同时发送时，结果的总线数值将是“显性”。例如，在总线的“线与”操作情况下，“显性”电平由逻辑“0”表示，而“隐性”电平由逻辑“1”表示。在CAN技术规范中，未给出表示这些逻辑电平的物理状态（例如电压、光）。

(14) 应答（Acknowledgment）。所有接收器均对接收报文的一致性进行检查，回答一个一致报文，并标志一个不一致报文。

(15) 睡眠方式/唤醒（Sleep Mode/Wake-up）。为降低系统功耗，CAN器件可被置于无任何内部活动的睡眠方式，相当于未连接的总线驱动器。借助于任何总线活动或者系统的内部条件而唤醒时，睡眠方式即告终结。当唤醒时，内部活动重新开始，然而在总线驱动器再次置于“在线”状态前，传送层将等待系统振荡器至稳定状态，并且一直等待至其自身同步于总线活动（通过检查11个连续的“隐性”位）。

为唤醒系统内仍处于睡眠状态的其他节点，可使用具有最小可能性的专用标识符（rrr rrrd rrrr，其中，r为隐性位，d为显性位）的特殊唤醒报文。

1.1.3 报文传送及其帧类型

接收器/发送器：发出一个报文的单元称为该报文的发送器。该单元在总线空闲或该单元丢失仲裁场前恒为发送器。若一个单元不是某个报文的发送器，并且总线不处于空闲状态，则称该单元为该报文的接收器。

报文的有效性：对于报文发送器和接收器，报文的实际

有效时刻是不同的。对于发送器而言，如果直到“帧结束”终结一直未出错，则报文有效。如果报文受损，将自动地并且按照优先权次序重发送。为了能同其他报文竞争访问总线，总线一旦空闲重发送立即开始。对于接收器而言，如果直到最后（除“帧结束”的那一位）一直未出错，则报文有效。

位流编码：构成一帧的帧起始、仲裁场、控制场、数据场和CRC序列均借助位填充规则进行编码。无论何时，当发送器在将被发送的位流中检测到数值相同的5个连续位时，会自动地在实际的发送位流中插入一个补码位。

数据帧或远程帧的其余位场（CRC界定符、应答场和帧结束）具有固定格式，不进行填充。出错帧和超载帧同样具有固定格式，并且不用位填充规则编码。

报文中的位流按照非归零（Non-Return-to-Zero, NRZ）码规则编码，这意味着在一个完整的位时间内，产生的位电平要么是“显性”，要么是“隐性”。

帧类型：报文传送由4种不同类型的帧表示和控制：数据帧（Data Frame）携带数据由发送器至接收器；远程帧（Remote Frame）通过总线单元发送，以请求发送具有相同标识符的数据帧；错误帧（Error Frame）由检测到总线错误的任何单元发送；超载帧（Overload Frame）用于提供在前的和随后的数据帧或远程帧之间的附加延迟。

数据帧和远程帧借助帧间空间与前面的帧分离开。

1.1.3.1 数据帧（Data Frame）

数据帧由7个不同的位场（Bit Frame）组成：帧起始（Start of Frame, SOF）、仲裁场（Arbitration Field）、控制场（Control Field）、数据场（Data Field）、CRC场（CRC Field）、应答场（ACK Field）、帧结束（End of Field, EOF）。数据场长度可为0。数据帧组成如图1.6-2所示。



图 1.6-2 数据帧组成

(1) 帧起始（SOF）标志数据帧和远程帧的起始，它仅由一个“显性”位构成。只有在总线处于空闲状态时，才允许站开始发送。所有站必须都同步于首先开始发送的那个站的帧起始前沿。

(2) 仲裁场由标识符和远程发送请求（RTR）位组成，如图1.6-3所示。

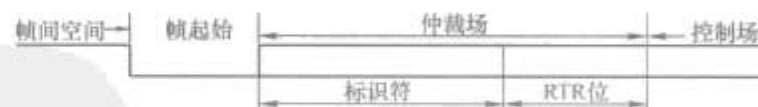


图 1.6-3 仲裁场组成

1) 标识符（Identifier）的长度为11位。这些位以ID₁₀~ID₀的顺序发送，最低位为ID₀，其中最高7位（ID₁₀~ID₄）必须不是全“隐性”。

2) RTR位（Remote Transmission Request Bit）在数据帧中，必须是“显性”的，而在远程帧中，RTR位必须是“隐性”的。

(3) 控制场由6位组成，如图1.6-4所示。控制场包括数据长度码和两个用于将来扩展的保留位，这两个保留位必须发送“显性”电平，而接收器接受“显性”和“隐性”位的全部组合。数据长度码DLC（Data Length Code）指明数据场的字节数目。数据长度码为4位，在控制场中被发送。数据长度码中数据字节数目编码见表1.6-1，其中：d表示

“显性”，r 表示“隐性”。对于数据场，允许的数据字节数目为 0, 1, …, 7, 8, 不能使用其他数据值。



图 1.6-4 控制场组成

表 1.6-1 数据长度码中数据字节数目编码

数据字节数目	数 据 长 度 码			
	DLC3	DLC2	DLC1	DLC0
0	d	d	d	d
1	d	d	d	r
2	d	d	r	d
3	d	d	r	r
4	d	r	d	d
5	d	r	d	r
6	d	r	r	d
7	d	r	r	r
8	r	d	d	d

- (4) 数据场由数据帧中被发送的数据组成，它可包括 0~8 字节，每个字节包括 8 位，其中首先发送最高有效位。
- (5) CRC 场包括 CRC 序列和 CRC 界定符，如图 1.6-5 所示。



图 1.6-5 CRC 场组成

1) CRC 序列是由循环冗余码求得的帧检查序列，最适用于位数小于 127 (BCH 码 Bose-Chaudhuri-Hocquenghem 博斯-乔赫里-霍克文黑姆码) 的帧。为实现 CRC 计算，被除的多项式被定义为这样一个多项式，其系数由包括帧起始、仲裁场、控制场、数据场(假若存在)在内的无填充位流给出，其 15 个最低位的系数为 0。此多项式被发生器产生的下列多项式除(系数为模 2 运算)

$$X^{15} + X^{14} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^4 + X^3 + 1 \tag{1.6-1}$$

这个多项式除法的余数即为发向总线的 CRC 序列。为完成此功能，可以使用一个 15 位的移位寄存器 CRC-RG (14:0)。若 NXTBIT 标记这样一个位流的下一位，该位流是由从帧起始直至数据场结束的无填充位的序列给定的，则 CRC 序列计算如下：

```
CRC-RG=0 //初始化移位寄存器
REPEAT
CRCNXT=NXTBITEXORCRC-RG(14);
CRC-RG(14:1)=CRC-RG(13:0); //寄存器左移一位
CRC-RG(0)=0;
IF CRCNXT THEN
CRC-RG(14:0)=CRC-RG(14:0)EXOR(4599H)
ENDIF
UNTIL(CRC 序列开始或者出现一个错误状态)
发送/接收数据场的最后一位后，CRC-RG 包含有 CRC 序列。
```

2) CRC 序列后随 CRC 界定符，它只包括一个“隐

性”位。

(6) 应答 (ACK) 场为两位长度，包括应答 (ACK) 间隙和应答 (ACK) 界定符，如图 1.6-6 所示。在应答场中，发送站送出两个“隐性”位。正确接收到有效报文的接收器，在应答间隙期间，通过传送一个“显性”位将此信息报告给发送器(接收器发送“应答”)。所有接收到匹配 CRC 序列的站，在应答间隙期间通过把“显性”位写入发送器的“隐性”位来报告此信息。应答界定符是应答场的第二位，并且必须是“隐性”位。因此，应答间隙被两个“隐性”位 (CRC 界定符和应答界定符) 包围。



图 1.6-6 应答场组成

- (7) 帧结束 (EOF)。每个数据帧和远程帧均是由 7 个“隐性”位组成的标志序列界定的。
- 1.1.3.2 远程帧 (Remote Frame)

一个作为某个确定数据接收器的站，可以通过发送一个远程帧激活一个源节点发送其数据。远程帧由 6 个不同的位场组成：帧起始、仲裁场、控制场、CRC 场、应答场和帧结束。

与数据帧相反，远程帧的 RTR 位是“隐性”的。远程帧不存在数据场。DLC 的数值是独立的，它可以被标注为范围为 0~8 中的任何数值。这一数值为对应数据帧的 DLC。远程帧组成如图 1.6-7 所示。



图 1.6-7 远程帧组成

- RTR 位极性指明所发送帧是数据帧 (RTR 位为“显性”) 还是远程帧 (RTR 位为“隐性”)。
- 1.1.3.3 错误帧 (Error Frame)

错误帧由两个不同场组成，第一个场由来自各站的错误标志 (Error Flage) 叠加得到，后随的第二个场是错误界定符 (Error Delimiter)，如图 1.6-8 所示。

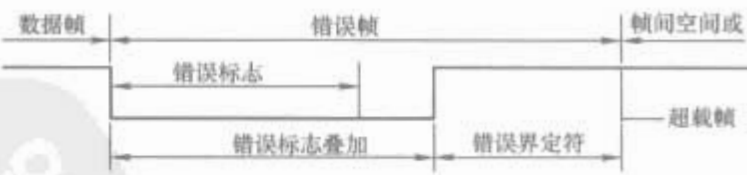


图 1.6-8 错误帧组成

为了正确地终止错误帧，一种“错误认可”节点可以使总线处于“总线空闲”状态至少 3 位时间(如果“错误认可”接收器本身存在错误)，因而总线不应该被加载至 100%。

错误标志具有两种形式：一种是激活错误标志 (Active Error Flag)；另一种是认可错误标志 (Passive Error Flag)。激活错误标志由 6 个连续的“显性”位组成，而认可错误标志由 6 个连续的“隐性”位组成，除非它被来自其他节点的“显性”位改写。

一个检测到错误状态的“错误激活”站通过发送一个激活错误标志来标注该错误。这一错误标志形式违背适用于由

帧起始至CRC界定符的所有场的位填充规则，或者破坏了应答场或帧结束场的固定形式。因而，所有其他站将检测到错误状态，并且由它们的部件开始发送错误标志。这样，在总线上实际被监视到的“显性”位序列是由各个单独站发送的不同错误标志叠加而形成的。该序列的总长度在最小值6位和最大值12位之间变化。

一个检测到错误状态的“错误认可”站通过发送一个认可错误标志来试图标注该错误。该“错误认可”站以认可错误标志的开始为起点等待6个相同极性的连续位。当检测到6个相同位后，认可错误标志即告完成。

错误界定符包括8个“隐性”位。错误标志发送后，每个站都送出“隐性”位并监视总线，直至检测到一个“隐性”位。此后，开始发送剩余的7个“隐性”位。

1.1.3.4 超载帧 (Overload Frame)

超载帧包括两个位场：超载标志和超载界定符。超载帧组成如图1.6-9所示。



图 1.6-9 超载帧组成

存在两种导致发送超载标志的超载条件：一种是接收器的内部条件，接收器要求下一个数据帧或远程帧的延迟；另一种是在间歇场检测到“显性”位。由前一种超载条件引起的超载帧起点，仅允许在期望间歇场的第一位时间开始，而由后一种超载条件引起的超载帧在检测到“显性”位后开始发送第一位。最多可产生2个超载帧用于延迟下一个数据帧或远程帧。

超载标志 (Overload Flage) 由6个“显性”位组成，全部形式对应于激活错误标志形式。超载标志形式破坏了间歇场的固定形式。因而，所有其他站都将检测到一个超载条件，并且由它们的部件开始发送超载标志。当某个节点在间歇场第3位期间检测到“显性”位的情况下，其他节点将不能正确理解超载标志，而将6个“显性”位的第一位理解为帧起始。第6个“显性”位违背位填充规则，导致错误状态。

超载界定符 (Overload Delimiter) 由8个“隐性”位组成。超载界定符与错误界定符具有相同的形式。发送超载标志后，站监视总线直至检测到由“显性”到“隐性”位的发送。在此时刻，总线上的每个站均完成送出其超载标志，并且所有站一致地开始发送剩余的7个“隐性”位。

1.1.3.5 帧间空间 (Interframe Space)

数据帧和远程帧与其前面的帧（不管它们是何种帧：数据帧、远程帧、错误帧或超载帧）均以称为帧间空间的位场分隔开。相反，在超载帧和错误帧前面没有帧间空间，并且多个超载帧也不被帧间空间分隔。

帧间空间包括间歇场和总线空闲场，对于已经发送先前报文的“错误认可”站还有暂停发送场 (Suspend Transmission)。对于非“错误认可”或已经接收先前报文的站，其帧间空间如图1.6-10 (a) 所示；对于已经发送先前报文的“错误认可”站，其帧间空间如图1.6-10 (b) 所示。

间歇场 (Intermission Field) 由3个“隐性”位组成。间歇场期间，不允许任何站启动发送数据帧或远程帧。唯一的作用是标注超载条件。

总线空闲场 (Bus Idle Field) 持续时间可为任意长度。此时，总线是开放的，因而任何需要发送的站均可访问总

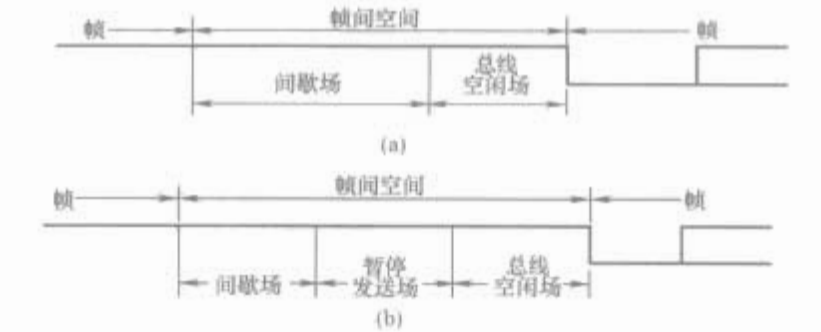


图 1.6-10 帧间空间两种构成
(a) 非“错误认可”或已接收先前报文的站的帧间空间；
(b) 已发送先前报文的“错误认可”站的帧间空间

线。在其他报文发送期间，待发送的报文在间歇场后的第一位开始发送。检测到总线上的一个“显性”位将被理解为帧起始。

暂停发送场 (Suspend Transmission Field)：“错误认可”站发完一个报文后，在开始下一次报文发送或认可总线空闲之前，它紧随间歇场后送出8个“隐性”位。如果在此期间其他站开始一次发送，该站将变为报文接收器。

1.1.4 错误类型和界定

在CAN总线中存在5种不同的错误类型（它们并不相互排斥）。

1.1.4.1 位错误 (Bit Error)

向总线送出一位的某个单元同时也在监视总线。当监视到的总线位数值与送出的位数值不同时，则在该位时刻检出一个位错误。例外情况是，在仲裁场的填充位流期间或应答间隙期间送出一个“隐性”位，而检测到一个“显性”位时，不视为位错误。送出认可错误标志的发送器，而检测到“显性”位时，也不视为位错误。

1.1.4.2 填充错误 (Stuff Error)

在应使用位填充方法进行编码的报文中，出现了第6个连续相同的位电平时，将检出一个填充错误。

1.1.4.3 CRC 错误 (CRC Error)

CRC序列是由发送器完成的CRC计算结果组成的。接收器以与发送器相同的方法计算CRC。如果计算结果与接收到的CRC序列不相同，则检出一个CRC错误。

1.1.4.4 形式错误 (Form Error)

当固定形式的位场中出现一个或更多非法位时，则检出一个形式错误。

1.1.4.5 应答错误 (Acknowledgement Error)

在应答间隙期间，发送器未检测到“显性”位，则由它检出一个应答错误。

检测到错误状态的站通过发送错误标志来标注该错误。当任何一个站在任何时候检测出位错误、填充错误、形式错误或应答错误时，由该站在下一位开始发送错误标志。

当检测到CRC错误时，错误标志在应答界定符后面那一位开始发送，除非用于其他错误状态的错误标志已经开始发送。

在CAN总线中，就故障界定而言，一个单元可能处于下列三种状态之一：“错误激活”(“Error Active”)、“错误认可”(“Error Passive”)和“总线脱离”(“Bus off”)。

检测到错误状态的站通过发送错误标志来标注该错误。对于“错误激活”节点，它为激活错误标志；而对于“错误认可”节点，它为认可错误标志。

“错误激活”单元可以正常参与总线通信，并且当检测到错误时，送出一个激活错误标志。不允许“错误认可”单元送出激活错误标志，它可参与总线通信，但当检测到错误

时,只能送出认可错误标志。并且在一次发送后,“错误认可”单元将一直等到下一次发送开始前。不允许“总线脱离”单元对总线有任何影响(例如,输出驱动器关闭)。

为了界定故障,在每个总线单元中都设有两种计数:发送错误计数和接收错误计数。这些计数按照下列规则进行(在给定报文传送期间,可应用其中一个以上规则):

(1) 接收器检出错误时,接收错误计数加1,除非所检出错误是发送激活错误标志或超载标志期间的位错误。

(2) 接收器在送出错误标志后的第一位检出一个“显性”位时,接收错误计数加8。

(3) 发送器送出一个错误标志时,发送错误计数加8。其中有两种例外情况:一种是如果发送器为“错误认可”,因未检测到“显性”应答而检测到一个应答错误,并且在送出其认可错误标志时,未检测到“显性”位;另一种是如果由于仲裁期间(其填充位处于RTR位前)发生的填充错误,发送器送出一个错误标志,本应是“隐性”的,而且确实发送的是“隐性”的,但监视到的为“显性”的。在以上两种例外情况下,发送错误计数不改变。

(4) 如果发送器送出一个激活错误标志或超载标志时,发送器检测到位错误,则发送错误计数加8。

(5) 如果接收器送出一个激活错误标志或超载标志时,接收器检测到位错误,则接收错误计数加8。

(6) 在送出激活错误标志、认可错误标志或超载标志后,任何节点都容许多至7个连续的“显性”位。在检测到第14个连续的“显性”位后(在激活错误标志或超载标志情况下),或紧随认可错误标志检测到第8个连续的“显性”位后,以及附加的8个连续的“显性”位的每个序列后,每个发送器的发送错误计数都加8,并且每个接收器的接收错误计数也都加8。

(7) 报文成功发送后(得到应答,并且直至帧结束未出现错误),则发送错误计数减1,除非它已经为0。

(8) 报文成功接收后(直至应答间隙无错误接收,并且成功地送出应答位);则接收错误计数减1,如果它处于1~127之间;若接收错误计数为0,则仍保留0;而若它大于127,它将其置为119~127之间的某个数值。

(9) 发送错误计数等于或大于128或接收错误计数等于或大于128时,节点为“错误认可”。导致节点变为“错误认可”的错误状态使节点送出一个激活错误标志。

(10) 发送错误计数大于或等于256时,节点为“总线脱离”。

(11) 发送错误计数和接收错误计数两者均小于或等于127时,“错误认可”节点再次变为“错误激活”节点。

(12) 在检测到总线上11个连续的“隐性”位发生128次后,“总线脱离”节点将变为两个错误计数器均置为0的“错误激活”节点(不再是“总线脱离”)。

当错误计数值大于96时,说明总线被严重干扰。它提供测试此状态的一种手段。

若系统起动期间,仅有一个节点在线,此节点发送报文后,将得不到应答,检出错误并重复该报文。它可以变为“错误认可”,但不会因此“总线脱离”。

1.1.5 位定时要求

有关CAN总线中位定时要求包括如下一些重要概念。

正常位速率(Nominal Bit Rate):在非重同步情况下,借助理想发送器每秒发送的位数。

正常位时间(Nominal Bit Time):正常位速率的倒数,可表示为

正常位时间=1/正常位速率

正常位时间可划分为几个互不重叠的时间段。这些时间段包括:同步段(SYNC-SEG)、传播时间段(PROP-SEG)、相位缓冲器段1(PHASE-SEG1)和相位缓冲器段2(PHASE-SEG2)。组成位时间的这些段如图1.6-11所示。

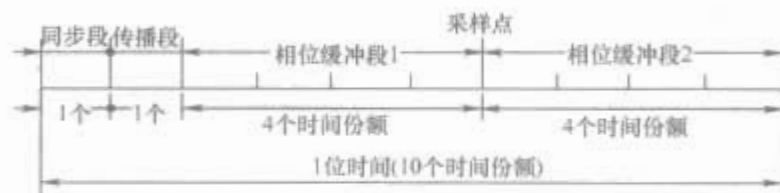


图 1.6-11 位时间的各组成部分

同步段:用于使总线上的各个节点同步。要求有一个跳变沿位于此段内。

传播段:用于补偿网络内的物理延时。它是信号在总线上传播时间、输入比较器延时和输出驱动器延时之和的两倍。

相位缓冲器段1和相位缓冲器段2:用于补偿沿的相位误差。通过重同步,这两个时间段可被延长或缩短。

采样点(Sample Point):是这样一个时刻,在此时刻上,总线电平被读,并被理解为其自身位的数值。它位于相位缓冲器段1的终点。

信息处理时间:是由采样点开始、为计算后续位电平而保留的时间段。

时间份额(Time Quantum):是由振荡器周期派生出的一个固定时间单元。存在一个可编程的预引比例因子,其整个数值范围至少由1~32,以最小时间份额为起点,时间份额可为

时间份额= $m \times$ 最小时间份额

式中: m 为预引比例因子。

正常位时间中各时间段长度:SYNC-SEG为1个时间份额;PROP-SEG长度可编程为1,2,...,8个时间份额;PHASE-SEG1长度可编程为1,2,...,8个时间份额;PHASE-SEG2长度为PHASE-SEG1和信息处理时间的最大值;信息处理时间长度小于或等于2个时间份额。在位时间中,时间份额的总数必须被编程为至少由8~25。

硬同步(Hard Synchronization):硬同步后,内部位时间从SYNC-SEG重新开始。因而,硬同步强迫引起硬同步的沿处于重新开始的位时间同步段之内。

重同步跳转宽度(Resynchronization Jump Width):作为重同步的结果,PHASE-SEG1可被延长或PHASE-SEG2可被缩短。这两个相位缓冲段的延长或缩短的数值有一个由重同步跳转宽度给定的上限。重同步跳转宽度应编程为1和 $\min(4, \text{PHASE-SEG1})$ 之间。

时钟信息可由一位数值到另一位数值的跳变取得。具有相同数值的连续位的最大个数是唯一而固定的,这一特性提供了在帧期间总线单元重同步于位流的可能性。可被用于重同步的两个跳变之间的最大长度是29个位时间。

沿相位误差(Phase Error of an Edge):沿相位误差由沿相对于SYNC-SEG的位置给定,以时间份额量度。相位误差的符号定义如下:

- 若沿处于SYNC-SEG之内,则 $e=0$;
- 若沿处于采样点之前,则 $e>0$;
- 若沿处于前一位的采样点之后,则 $e<0$ 。

重同步(Resynchronization):当引起重同步的沿的相位误差数值小于或等于重同步跳转宽度编程值时,重同步的作用

与硬同步的作用相同。当相位误差数值大于重同步跳转宽度，且相位误差为正时，则 PHASE-SEG1 延长数值等于重同步跳转宽度。当相位误差数值大于重同步跳转宽度，且相位误差为负时，则 PHASE-SEG2 缩短数值等于重同步跳转宽度。

同步规则 (Synchronization Rules)：硬同步和重同步是同步的两种形式。它们遵从下列规则：①在一个位时间内仅允许一种同步。②只要在先前采样点上检测到的数值（先前读到的总线数值）与一个沿过后立即得到的总线数值不同，则该沿将被用于同步。③在总线空闲期间，无论何时当存在一个“隐性”至“显性”的跳变沿，则执行一次硬同步。④所有履行规则①和②的其他“隐性”至“显性”的跳变沿（和在低位速率的情况下，选择的“显性”至“隐性”的跳变沿）都将被用于重同步。例外情况是，若只有“隐性”至“显性”沿被用于重同步，作为具有正相位误差的“隐性”至“显性”沿的结果，一个发送显性位的节点将不执行重同步。

1.2 CAN 技术规范 2.0B

CAN 技术规范 2.0B 与 CAN 技术规范 2.0A 的主要不同在于，2.0A 给出的是曾在 CAN 技术规范版本 1.2 中定义的 CAN 报文格式，而 2.0B 给出了标准的和扩展的两种报文格式。

1.2.1 CAN 节点的分层结构

为使设计透明并且执行灵活，遵循 ISO/OSI 标准模型，CAN 分为数据链路层 [包括逻辑链路控制 (Logical Link Control, LLC) 子层及媒体访问控制 (Medium Access Control, MAC) 子层] 和物理层。而在 CAN 技术规范 2.0A 版本中，数据链路层的 LLC 和 MAC 子层的服务和功能被描述为“对象层”和“传送层”。CAN 分层结构和功能如图 1.6-12 所示。

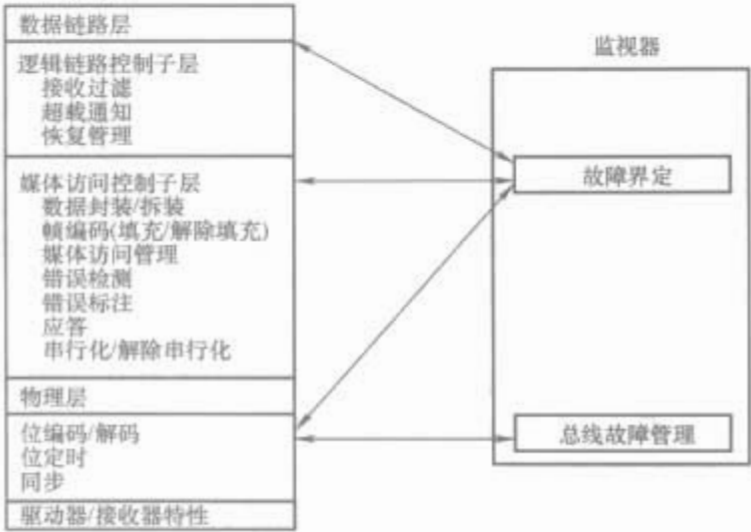


图 1.6-12 CAN 分层结构和功能

LLC 子层的主要功能是：为数据传送和远程数据请求提供服务，确认由 MAC 子层接收的报文实际已被接收和为恢复管理和通知超载提供信息。在定义对象处理时，存在许多灵活性。MAC 子层的功能主要是传送协议，亦即控制成帧、执行仲裁、错误检测、错误标注和故障界定。在 MAC 子层中要判定，总线是否开放，以便开始一次新的发送，或者是否立即开始接收。位定时的某些一般特性也是 MAC 子层的一部分。MAC 子层特性不存在修改的灵活性。物理层的范围是有关全部电气特性的不同节点间的位的实际传送。自然，在一个网络内，物理层所有节点必须是相同的。然而，在选择物理层时存在很大的灵活性。

CAN 技术规范 2.0B 定义数据链中的 MAC 子层和 LLC 子层的一部分，并描述与 CAN 有关的外层。物理层定义信

号怎样进行发送，因而涉及位定时、位编码和同步的描述。在这部分技术规范中未定义物理层的驱动器/接收器特性，以便允许根据它们的应用，对发送媒体和信号电平进行优化。MAC 子层是 CAN 协议的核心。它把接收到的报文呈现给 LLC，并接收来自 LLC 的报文以便发送。MAC 子层负责报文成帧、仲裁、应答、错误检测和标注。MAC 子层由称为故障界定的一个管理实体监控。它具有识别永久性故障或短暂扰动的自检机制。LLC 子层的主要功能是报文过滤、超载通知和恢复管理。

1.2.2 帧格式和帧类型

在 CAN 2.0B 中存在两种不同的帧格式，其区别在于标识符场的长度：具有 11 位标识符的帧称为标准帧；相对地，包括 29 位标识符的帧称为扩展帧。

如 CAN 技术规范 1.2 版本所描述，标准数据格式/远程帧格式是等效的，而扩展格式是 CAN 协议新增加的特性。为使控制器设计相对简单，并不要求执行完全的扩展格式（例如，以扩展格式发送报文或由扩展格式报文接收数据），但必须不加以任何限制地支持标准格式。

如果新型控制器在帧格式方面至少具有下列特性，则可被认为同 CAN 技术规范兼容：每个新控制器均支持标准格式；每个新控制器均可接收扩展格式报文。这种要求不致因它们的格式而破坏扩展帧，然而，这并不要求新型控制器必须支持扩展格式。

CAN 技术规范 2.0B 对于报文过滤特别加以描述。报文过滤以整个标识符为基准。允许将任何标识符位设置为对报文过滤是“不关心”的。屏蔽寄存器可用于选择一组标识符，以便映像至接收缓冲器中。如果使用屏蔽寄存器，屏蔽寄存器每一位必须是可编程的，亦即它们对于报文过滤是可开放或禁止的。屏蔽寄存器的长度可以是整个标识符，也可以仅是其中的一部分。

报文传送由 4 种不同类型的帧表示和控制：数据帧——携带数据由发送器至接收器；远程帧——通过总线单元发送，以请求发送具有相同标识符的数据帧；错误帧——由检测到发现总线错误的任何单元发送；超载帧——用于提供在前的和随后的数据帧或远程帧之间的附加延迟。数据帧和远程帧可使用标准帧格式和扩展帧格式，它们借助帧间空间与前面的帧分离。

1.2.2.1 数据帧

数据帧由 7 个不同的位场组成：帧起始、仲裁场、控制场、数据场、CRC 场、应答场、帧结束。数据场长度可为 0。标准格式和扩展格式数据帧如图 1.6-13 所示。



图 1.6-13 标准格式和扩展格式数据帧

(1) 帧起始 (标准格式和扩展格式)。帧起始 (Start Of Frame, SOF) 标志数据帧和远程帧的起始，它仅由一个“显性”位构成。只有在总线处于空闲状态时，才允许站开始发送。所有站必须都同步于首先开始发送的那个站的帧起始前沿。

(2) 仲裁场。对于标准格式和扩展格式，仲裁场的格式

不同。在标准格式中,仲裁场由 11 位标识符和远程发送请求(RTR)位组成,标识符位为 ID-28~ID-18;而在扩展格式中,仲裁场由 29 位标识符和替代远程请求(Substitute Remote Request, SRR)位、标识(Identifier Extension Bit, IDE)位和远程发送请求位组成,标识符位为 ID-28~ID-0。

为了区别标准格式和扩展格式,先前 CAN 技术规范 1.0~1.2 版本中的位 r1,现在记为 IDE 位。标识符分为标准格式标识符和扩展格式标识符。标准格式标识符的长度为 11 位,并且对应于扩展形式中的基本 ID。这些位以 ID-28~ID-18 的顺序发送,最低位为 ID-18,其中最高 7 位(ID-28~ID-22)必须不是全“隐性”;而扩展格式标识符与标准格式不同,扩展格式由 29 位组成。这种格式分为两部分:11 位基本 ID 和 18 位扩展 ID。基本 ID 由 11 位组成,它以 ID-28~ID-18 的顺序发送,它等效于标准标识符格式。基本 ID 确定了扩展格式的基本优先权。扩展 ID 由 18 位组成,它以 ID-17~ID-0 的顺序发送。在标准格式中,标识符后为 RTR 位。

RTR 位(标准格式和扩展格式) 在数据帧中, RTR

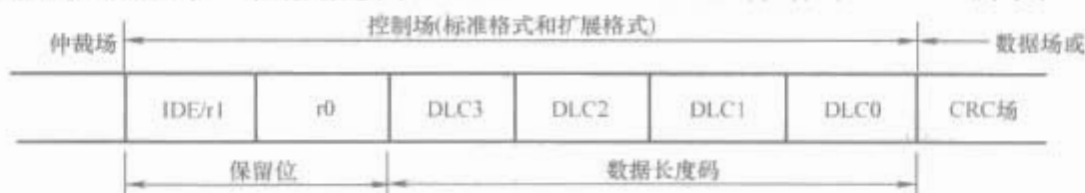


图 1.6-14 标准格式和扩展格式的控制场

数据长度码(Data Length Code, DLC)(标准格式和扩展格式):数据场的字节数目由数据长度码指明。数据长度码为 4 位,在控制场中被发送。允许的数据字节数目为 0, 1, ..., 7, 8, 不能使用其他数值。

(4) 数据场(标准格式和扩展格式)。数据场由数据帧中被发送的数据组成,它可包括 0~8 个字节,每个字节包括 8 位,其中首先发送最高有效位。

(5) CRC 场(标准格式和扩展格式)。包括 CRC 序列,后随 CRC 界定符。CRC 序列(标准格式和扩展格式)是由循环冗余码求得的帧检查序列,最适用于位数小于 127(BCH 码)的帧。

为实现 CRC 计算,被除的多项式定义为这样一个多项式,其系数由包括帧起始、仲裁场、控制场、数据场(假若存在)在内的无填充位流给出,其 15 个最低位的系数为 0。此多项式被发生器产生的下列多项式除(系数为模 2 运算)

$$X^{15} + X^{14} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^4 + X^3 + 1$$

这个多项式除法的余数即为发向总线的 CRC 序列。为完成此功能,可以使用一个 15 位的移位寄存器 CRC-RG(14:0)。若 NXTBIT 标记这样一个位流的下一位,该位流是由从帧起始直至数据场结束的无填充位的序列给定的,则 CRC 序列被计算如下:

CRC-RG=0 //初始化移位寄存器

REPEAT

CRCNXT=NXTBIT EXOR CRC-RG(14);

CRC-RG(14:1)=CRC-RG(13:0); //寄存器左移一位

CRC-RG(0)=0;

IF CRCNXT THEN

CRC-RG(14:0)=CRC-RG(14:0)EXOR(4599H)

ENDIF

UNTIL(CRC 序列开始或者出现一个错误状态)

发送/接收数据场的最后一位后, CRC-RG 包含有 CRC 序列。

位必须是“显性”电平,而在远程帧中, RTR 位必须是“隐性”电平。在扩展格式中,先发送基本 ID,其后是 SRR 位和 IDE 位。扩展 ID 在 IDE 位后发送。

SRR 位(扩展格式): SRR 位为隐性位。在扩展格式中,它在标准格式的 RTR 位位置上被发送,并替代标准格式中的 RTR 位。这样,标准格式和扩展格式的冲突由于扩展格式的基本 ID 与标准格式的 ID 相同而告解决。因此,标准格式较之扩展格式更为流行。

IDE 位(扩展格式): IDE 位对于扩展格式属于仲裁场;对于标准格式属于控制场。IDE 在标准格式中以“显性”电平发送,而在扩展格式中为“隐性”电平。

(3) 控制场(标准格式和扩展格式)。控制场由 6 位组成。标准格式和扩展格式的控制场格式不同。在标准格式中,一帧包括数据长度码、发送“显性”电平的 IDE 位和保留位 r0。在扩展格式中,一帧包括数据长度码和两个保留位 r1 和 r0,这两个保留位必须发送“显性”电平,而接收器认可“显性”和“隐性”位的所有组合。标准格式和扩展格式的控制场如图 1.6-14 所示。

CRC 序列后随 CRC 界定符(标准格式和扩展格式),它只包括一个“隐性”位。

(6) 应答场(标准格式和扩展格式)。应答场为两位长度,包括应答间隙和应答界定符。在应答场中发送站送出两个“隐性”位。一个正确地接收到有效报文的接收器,在应答间隙期间,通过传送一个“显性”位将此信息报告给发送器(接收器发送“应答”)。

所有接收到匹配 CRC 序列的站,在应答间隙期间通过把“显性”位写入发送器的“隐性”位来报告此信息。应答界定符是应答场的第二位,并且必须是“隐性”位。因此,应答间隙被两个“隐性”位(CRC 界定符和应答界定符)包围。

(7) 帧结束(标准格式和扩展格式)。每个数据帧和远程帧均是由 7 个“隐性”位组成的标志序列界定的。

1.2.2.2 远程帧

一个作为某个确定数据接收器的站,可以通过发送一个远程帧激活一个源节点发送其数据。远程帧存在标准的和扩展的两种格式。在两种情况下,均由 6 个不同的位场组成:帧起始、仲裁场、控制场、CRC 场、应答场和帧结束。与数据帧相反,远程帧的 RTR 位是“隐性”。远程帧不存在数据场。DLC 的数值是独立的,它可以被标注为范围为 0~8 中的任何数值。这一数值为对应数据帧的 DLC。

RTR 位极性指明所发送帧是数据帧(RTR 位为“显性”),还是远程帧(RTR 位为“隐性”)。

1.2.2.3 错误帧

错误帧由两个不同场组成,第一个场由来自各站的错误标志叠加得到,后随的第二个场是错误界定符。

为了正确地终止错误帧,一种“错误认可”节点可以使总线处于“总线空闲”状态至少 3 位时间(如果“错误认可”接收器本身存在错误),因而总线不应该被加载至 100%。

错误标志有两种形式:一种是激活错误标志(Active Error Flag),另一种是认可错误标志(Passive Error Flag)。激活错误标志由 6 个连续的“显性”位组成;而认可错误标

志由6个连续的“隐性”位组成，除非其被来自其他节点的“显性”位改写。

一个检测到错误状态的“错误激活”站通过发送一个激活错误标志来标注该错误。这一错误标志形式违背适用于由帧起始至CRC界定符的所有场的位填充规则，或者破坏了应答场或帧结束场的固定形式。因而，所有其他站将检测到错误状态，并且由它们的部件开始发送错误标志。这样，在总线上实际被监视到的“显性”位序列是由各个单独站发送的不同错误标志叠加而形成的。该序列的总长度在最小值6位和最大值12位之间变化。

一个检测到错误状态的“错误认可”站通过发送一个认可错误标志来试图标注该错误。该“错误认可”站以认可错误标志的开始为起点等待6个相同极性的连续位。当检测到6个相同位后，认可错误标志即告完成。

错误界定符包括8个“隐性”位。错误标志发送后，每个站都送出“隐性”位并监视总线，直至检测到一个“隐性”位。此后，开始发送剩余的7个“隐性”位。

1.2.2.4 超载帧

超载帧包括两个位场：超载标志和超载界定符。

存在两种导致发送超载标志的超载条件：一个是接收器的内部条件，接收器要求下一个数据帧或远程帧的延时；另一个是在间歇场的第1和第2位上检测到“显性”位。若一个CAN节点在错误界定符或超载界定符的第8位（最后一位）采样到一个显性位，它将开始发送超载帧（不是出错帧）。错误计数器将不再增加。

由前一个超载条件引起的超载帧起点，仅允许在间歇场的第一位时间开始，而由后一个超载条件引起的超载帧在检测到“显性”位后开始发送第一位。最多可产生2个超载帧用于延迟下一个数据帧或远程帧。

超载标志由6个“显性”位组成。全部形式对应于激活错误标志形式。超载标志形式破坏了间歇场的固定形式。因而，所有其他站都将检测到一个超载条件，并且由它们的部件开始发送超载标志。在间歇场第3位期间检测到“显性”位的情况下，则将此位理解为帧起始。

超载界定符由8个“隐性”位组成。超载界定符与错误界定符具有相同的形式。发送超载标志后，站监视总线直至检测到由“显性”到“隐性”位的发送。在此时刻上，总线上的每个站均完成送出其超载标志，并且所有站一致地开始发送多于剩余的“隐性”位。

1.2.2.5 帧间空间

数据帧和远程帧与其前面的帧（不管它们是何种帧：数据帧、远程帧、错误帧或超载帧）均以称为帧间空间的位场分隔开。相反，在超载帧和出错帧前面没有帧间空间，并且多个超载帧也不被帧间空间分隔。帧间空间包括间歇场和总线空闲场，对于已经发送先前报文的“错误认可”站还有暂停发送场。

间歇场由3个“隐性”位组成。间歇场期间，不允许任何站起动发送数据帧或远程帧。唯一的作用是标注超载条件。总线空闲场持续时间可为任意长度。此时，总线是开放的，因而任何需要发送的站均可访问总线。在其他报文发送期间，待发送的报文，在间歇场后的第一位开始发送。检测到总线上的一个“显性”位将被理解为帧起始。

暂停发送场是在“错误认可”站发完一个报文后，在开始下一次报文发送或认可总线空闲之前，紧随间歇场后送出8个“隐性”位。如果在此期间其他站开始一次发送，该站将变为报文接收器。

1.3 MAC 机制

CAN网络上一个节点发送的帧/报文可被网络上所有其他节点监听并应答。当总线处于空闲（开放）时，任何节点均可开始发送报文。若一个节点正在发送，其他节点只有在该节点发送完成以后，才可尝试发送。如图1.6-15所示，节点Y在 t_0 时刻想要发送，但通过监听网络得知此时节点X正在发送（总线上有节点X的帧），因此节点Y必须等待，直到节点X发送完毕，并经帧间空间之后，在 t_1 时刻才能发送。节点Y等待的时间为 $(t_1 - t_0)$ 。

如果两个或多个节点同时开始发送，则通过使用仲裁场[11位标识符和RTR位（对于标准格式）]的非破坏性逐位仲裁机制来解决总线访问冲突。其基础是，当一个隐性位（“1”）和一个显性位（“0”）同时被发送至总线上时，总线上所出现的结果为一个显性位（“0”）。

在仲裁场发送期间，每一个发送器均监听总线电平，并将它与自身发送的位相比较。若两值相等，则节点可继续发送。若一个节点发送一个隐性位（“1”），而在总线上监听到一个显性位（“0”），则此节点即失去仲裁，并必须停止发送。在当前发送结束后，失去仲裁的节点可尝试再次发送。图1.6-16给出了一个标准格式的CAN的逐位仲裁的例子。

由于标识符是由最高位至最低位被发送的，因此发送数值最小的标识符的节点会赢得仲裁。



图 1.6-15 CAN 媒体访问



图 1.6-16 CAN 的逐位仲裁的例子

1.4 数据帧与 CAN 中断速率

数据帧是最典型最常用的 CAN 帧，而标准格式既是基础也是较常用的（如 DeviceNet 只支持标准格式），本小节即以标准格式的数据帧为分析对象。

表 1.6-2 给出了标准格式的数据帧的 7 个位场及其位数（表中给出的位数未计及填充位）。可见，标准格式数据帧的最小位数为 44，最大位数为 108。一般地，将帧起始、仲裁场和控制场作为 CAN 头部（19 位），CRC 场、应答场和帧结束作为 CAN 尾部（25 位）。

表 1.6-2 标准格式数据帧位数

位场	帧起始	仲裁场		控制场		数据场 min~max	CRC 场		应答场		帧结束
		标识符	RTR 位	保留位	DLC		CRC 序列	CRC 界定符	应答间隙	应答界定符	
位数	1	11	1	2	4	0~64	15	1	1	1	7

在设计 CAN 节点/系统时，设计者应考虑由总线上的数据帧引起的对节点的中断的速率。由于 CAN 数据帧较小（0~8 字节），当因多个节点欲同时发送报文而使总线上出现连续的数据帧时，对用软件屏蔽或完全不屏蔽的接收器的中断发生率就会很高。图 1.6-17 给出了具有最小帧间空间（3 位）的 2 个背对背式（back-to-back）CAN 数据帧。由该图得到的表 1.6-3 说明了最坏情况下接收器的中断速率。此接收器接收一个连续的背对背式数据帧链路上的所有帧。

表 1.6-3 由 CAN 数据帧引起的最小 CAN 中断时间

数据字节数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
数据帧位数	47	55	63	71	79	87	95	103	111
125kbit/s 下的中断时间 (1 位时间=8μs)(μs)	376	440	504	568	632	696	760	824	888
250kbit/s 下的中断时间 (1 位时间=4μs)(μs)	188	220	252	284	316	348	380	412	444
500kbit/s 下的中断时间 (1 位时间=2μs)(μs)	94	110	126	142	158	174	190	206	222



图 1.6-17 CAN 数据帧中断

2 独立 CAN 控制器 SJA1000

2.1 特性

- (1) 与 PCA82C200 独立 CAN 控制器引脚兼容。
- (2) 与 PCA82C200 独立 CAN 控制器电气兼容。
- (3) PCA82C200 模式（BasicCAN 模式是默认的）。
- (4) 扩展的接收缓冲器（64 字节 FIFO）。
- (5) 与 CAN 2.0B 协议兼容（在 PCA82C200 兼容模式中扩展帧认可）。

续表

数据字节数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1Mbit/s 下的中断时间 (1 位时间=1μs)(μs)	47	55	63	71	79	87	95	103	111

如表 1.6-3 所示，CAN 中断速率不是低速的。在 500kbit/s、1Mbit/s 下，对于 0 字节数据帧，中断每 94μs、47μs 产生一次。基于多数低端微控制器/微处理器的 CAN 节点不能跟上此中断速率（节点需要一定的时间来进行各种分析、处理）。因此，应根据 CAN 中断速率、节点功能和系统要求来为节点选择合适的微控制器/微处理器。必要时，可考虑选用一个单独的微控制器/微处理器来服务于 CAN 通信（接收、存储、预处理及发送等）。同时，应充分利用 CAN 控制器的屏蔽/匹配功能，以将不需接收的（数据）帧不经微控制器/微处理器直接屏蔽掉。

1.5 总线长度与位速率

CAN 总线长度与节点/网络的位速率有关。表 1.6-4 给出了 CAN 总线上任意两个节点的最大传输距离与其位速率的关系。表 1.6-4 中，BTR0、BTR1 分别指总线定时寄存器（Bus Timing Register）0、1，给出的 BTR0、BTR1 的数值是以 CAN 控制器 SJA1000 或 P8xC591 为例，使用的晶振频率为 16MHz（晶振漂移<0.1%）。

若要增加总线长度，可采用中继器/网桥等网络互联设备。

表 1.6-4 CAN 总线系统任意两个节点之间的最大距离

位速率	最大总线长度	总线定时（SJA1000 或 P8xC591， 晶振频率 16MHz）(h)	
		BTR0	BTR1
1Mbit/s	40m	00	14
500kbit/s	130m	00	1C
250kbit/s	270m	01	1C
125kbit/s	530m	03	1C
100kbit/s	620m	43	2F
50kbit/s	1.3km	47	2F
20kbit/s	3.3km	53	2F
10kbit/s	6.7km	67	2F
5kbit/s	10km	7F	7F

- (6) 既支持 29 位标识符，也支持 11 位标识符。
- (7) 位速率可达 1Mbit/s。
- (8) PeliCAN 模式扩展：
 - 1) 带有读/写访问的错误计数器。
 - 2) 可编程的错误报警极限。
 - 3) 最近错误代码寄存器。
 - 4) 对每一种 CAN 总线错误的错误中断。
 - 5) 具有详细位状态的仲裁丢失中断。
 - 6) 单次短发送（无重发）。

- 7) 只听模式（无应答、无激活错误标志）。
- 8) 支持热插（软件驱动位速率检测）。
- 9) 接受过滤器扩展（4 字节码，4 字节屏蔽）。
- 10) 自身报文的接收（自接收请求）：① 24MHz 时钟频率；② 与各种微控制器的接口；③ 可编程的 CAN 输出驱动器配置；④ 扩展的环境温度范围（-40℃~+125℃）。

2.2 一般说明

SJA1000 是一种用于控制器局域网（CAN）的独立控制器，CAN 应用在汽车和一般工业环境中。SJA 1000 是 PHILIPS 半导体 PCA82C200 CAN 控制器（BasicCAN）的替代产品，它增加了一种新的工作模式（PeliCAN），这种模式支持具有很多新特性的 CAN 2.0B 协议规范。

SJA1000 封装形式有两种：一种为 28 引脚的塑质双列式封装（DIP28）；另一种为 28 引脚的塑质小型线外封装（SO28）。

2.3 框图

SJA1000 的框图如图 1.6-18 所示。

2.4 引脚排列

SJA1000 的引脚排列如表 1.6-5 所示。

表 1.6-5 SJA1000 的引脚排列		
符号	引脚	说 明
AD7~AD0	2, 1, 28~23	多路地址/数据总线
ALE/AS	3	ALE 输入信号（Intel 模式），AS 输入信号（Motorola 模式）
CS	4	片选输入端，低电平允许访问 SJA1000
RD/E	5	来自微控制器的 RD 信号（Intel 模式）或 E 使能信号（Motorola 模式）
WR	6	来自微控制器的 WR 信号（Intel 模式）或 RD/WR 信号（Motorola 模式）
CLKOUT	7	由 SJA1000 产生的提供给微控制器的时钟输出信号；时钟信号由嵌入振荡器通过可编程分频器得到。时钟分频寄存器的时钟关闭位可使该引脚变为无用
VSS1	8	逻辑电路的接地端
XTAL1	9	至振荡器放大器的输入端，外部振荡器信号由此引脚输入 ^①
XTAL2	10	来自振荡器放大器的输出端；使用外部振荡器信号时，此输出端必须保持开路 ^①
MODE	11	模式选择输入端 1=选择 Intel 模式 0=选择 Motorola 模式
VDD1	12	输出驱动器的 5V 电源
TX0	13	从 CAN 输出驱动器 0 到物理总线的输出端
TX1	14	从 CAN 输出驱动器 1 到物理总线的输出端
VSS1	15	输出驱动器接地端

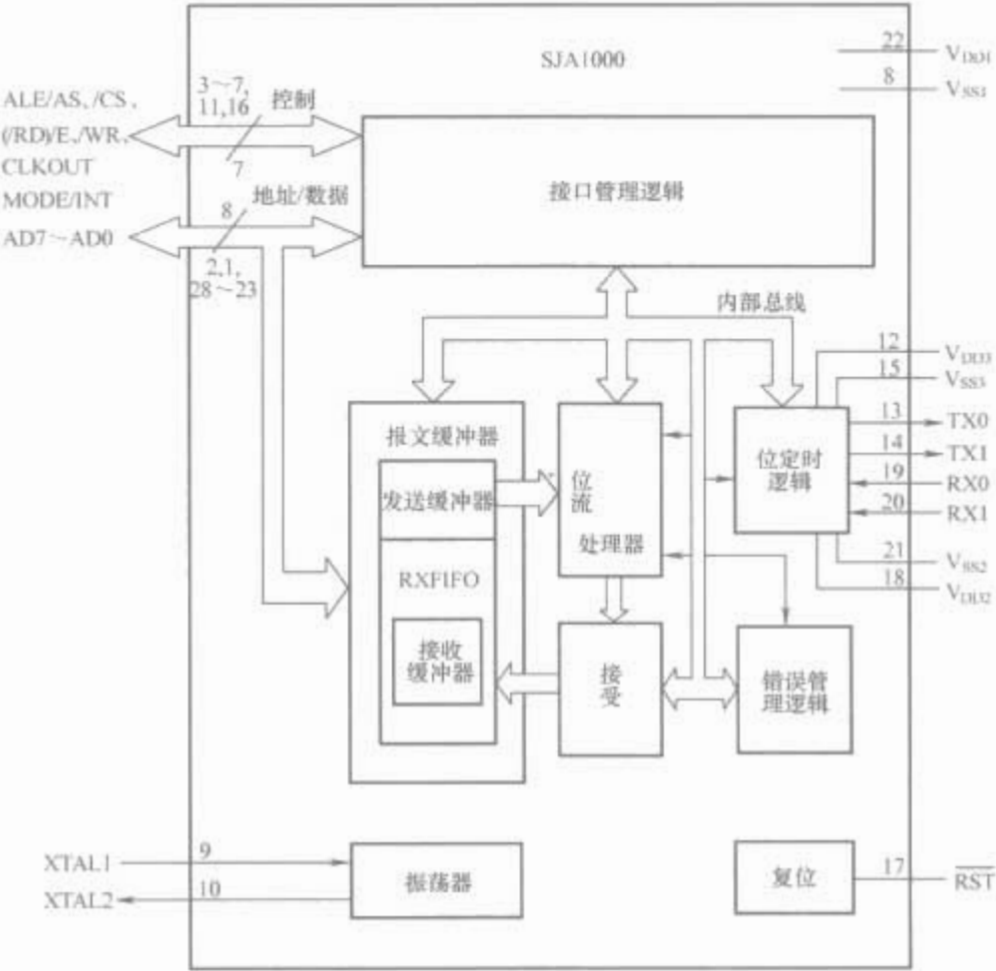


图 1.6-18 SJA1000 的框图

续表

符号	引脚	说 明
INT	16	中断输出，用于中断微控制器；INT 是激活的（低），如果中断寄存器的任何一位被置位；INT 是开漏输出，且被设计为与系统中的其他 INT 输出线或：此引脚上的低电平将使 IC 从睡眠模式中重新激活
RST	17	复位输入，用于复位 CAN 接口（激活为低）；将 RST 通过电容接至 VSS，通过电阻接至 VDD，可自动上电复位（例如 C = 1μF, R = 50kΩ）
VDD2	18	输入比较器的 5V 电源
RX0, RX1	19, 20	从物理 CAN 总线到 SJA1000 输入比较器的输入端；若它处于睡眠状态，显性电平将唤醒 SJA1000；如果 RX1 比 RX0 高，就会读出一个显性电平，反之读出为隐性电平；如果时钟分频寄存器中的 CBP 位被置位，CAN 输入比较器就被旁路，以减少内部延时，如果一个外部收发器电路被连到 SJA1000 上；这种情况下只有 RX0 是激活的；隐性电平被认为是高而显性电平被认为是低
VSS2	21	输入比较器的接地端
VDD1	22	逻辑电路的 5V 电源

① XTAL1 和 XTAL2 引脚应通过 15pF 的电容接至 VSS1。

SJA1000 和 SJA1000T 引脚排列分别如图 1.6-19 和图 1.6-20 所示。

2.5 功能说明

2.5.1 CAN 控制器模块的说明

(1) 接口管理逻辑（IML）。接口管理逻辑解释来自 CPU 的命令，控制 CAN 寄存器的寻址，向主控制器提供中断信息和状态信息。

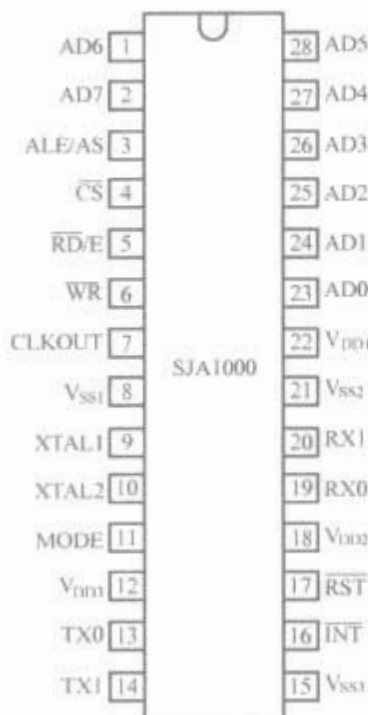


图 1.6-19 管脚配置 (DIP28)

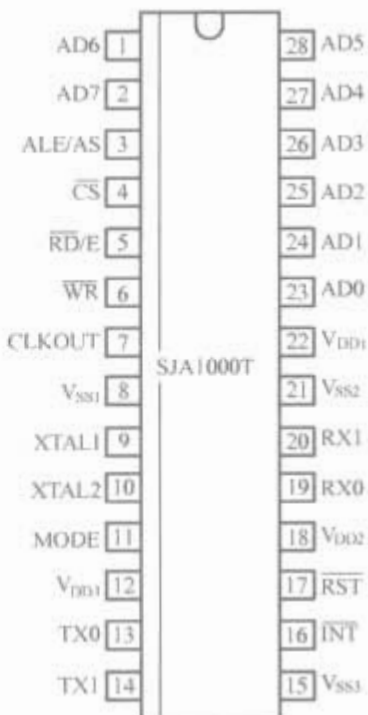


图 1.6-20 管脚配置 (SO28)

(2) 发送缓冲器 (TXB)。发送缓冲器是 CPU 和位流处理器 (BSP) 之间的一个接口, 能够存储向 CAN 网络上发送的一个完整报文。缓冲器有 13 个字节长, 由 CPU 写入、BSP 读出。

(3) 接收缓冲器 (RXB, RXFIFO)。接收缓冲器是接受过滤器和 CPU 之间的一个接口, 用来存储从 CAN 总线上接收并接受的报文。接收缓冲器 (RXB) 作为总长为 64 字节的接收 FIFO (RXFIFO) 的一个 13 字节窗口, 可被 CPU 访问。在此 FIFO 的帮助下, 当其他报文被接收时, CPU 可以处理一个报文。

(4) 接受过滤器 (ACF)。接受过滤器将被接收的标识符与接受过滤器寄存器的内容相比较, 并决定此报文是否应被接受。在可靠的接受测试情况下, 此完整的报文将存储在 FIFO 中。

(5) 位流处理器 (BSP)。位流处理器是一个控制发送缓冲器、RXFIFO 与 CAN 总线之间数据流的序列发生器, 它还执行错误检测、仲裁、填充和 CAN 总线上的错误处理。

(6) 位定时逻辑 (BTL)。位定时逻辑监视串行 CAN 总线和处理与总线有关的位定时。它被同步于一个报文起始的“隐性至显性”总线跳变时的 CAN 总线上的位流 (硬同步), 以及重同步于一个报文接收期间的更多的跳变 (软同步)。BTL 还提供可编程的时间段以补偿传播延时和相移 (例如由振荡器偏移造成的), 以及确定一个位时间内的采样点和将获取的采样次数。

(7) 错误管理逻辑 (EML)。EML 负责传送层上的错误界定。它接收来自 BSP 的错误报告, 然后将错误统计量通知给 BSP 和 IML。

2.5.2 CAN 控制器的详细说明

SJA1000 设计成在软件和引脚上都是与它的前一款——PCA82C200 独立控制器兼容。但是, 它补充了很多新的功能。为了达到软件兼容, 两种不同的工作模式可实现:

- (1) BasicCAN 模式: PCA82C200 兼容模式。
- (2) PeliCAN 模式: 扩展特性。

工作模式是随着时钟分频寄存器中被设置的 CAN 模式位而被选择的。复位时的默认模式是 BasicCAN 模式。

2.5.2.1 与 PCA82C200 兼容性

在 BasicCAN 模式中, SJA1000 模仿 PCA82C200 独立控制器所有已知的寄存器。关于软件兼容性, 下面所描述的特性与 PCA82C200 的设计不同。

(1) 同步模式。在控制寄存器中的同步位 (PCA82C200 中的 CR.6) 被取消, 同步只有借助于 CAN 总线上的隐性至显性的跳变才可能实现, 且写这一位是没有作用的。为了与现有应用软件兼容, 对这一位进行读访问将反映以前写入的值 (对触发电路无影响)。

(2) 时钟分频寄存器。时钟分频寄存器用来选择 CAN 工作模式 (BasicCAN/PeliCAN)。为此, 使用 PCA82C200 中保留位的一位, 正如可供 PCA82C200 使用一样, 写一个 0~7 之间的值, 就将进入 BasicCAN 模式。默认状态对 Motorola 模式是 12 分频、对 Intel 模式是 2 分频。保留位的另一位中可实现附加功能。如果一个外部收发器电路被使用, CBP 位的置位使内部 RX 输入比较器被旁路, 这样可以减少内部延时。

(3) 接收缓冲器。PCA82C200 中双接收缓冲器的概念被 PeliCAN 控制器中的接收 FIFO 所代替, 这对应用软件除了数据溢出概率之外没有影响。现在, 多于 2 个的报文可被接收 (多达 64 字节), 直到一个数据溢出发生。

(4) CAN2.0B。SJA1000 设计为支持全部 CAN2.0B 协议规范, 这就意味着像扩展帧报文的处理一样, 扩展的振荡器容差也是可实现的。在 BasicCAN 模式下只可以发送和接收标准帧报文 (11 位标识符)。如果扩展帧报文 (29 位标识符) 在总线上被检测到, 它们会被允许, 且若报文正确, 一个应答会被给出, 但没有接收中断产生。

2.5.2.2 BasicCAN 和 PeliCAN 模式的区别

在 PeliCAN 模式下, SJA1000 是以含有很多新功能的重组寄存器映像出现的。除若干新的位之外, PCA82C200 的所有已知的位也都是可用的。在 PeliCAN 模式中, 支持全部 CAN2.0B 的功能 (29 位标识符)。

SJA1000 的主要新特性:

- (1) 标准的和扩展的帧格式报文的接收和发送。
- (2) 接收 FIFO (64 字节)。
- (3) 用于标准帧和扩展帧的具有屏蔽寄存器和码寄存器的单/双接受过滤器。
- (4) 带有读/写访问的错误计数器。
- (5) 可编程的错误报警极限。
- (6) 最近错误代码寄存器。
- (7) 对每一种 CAN 总线错误的错误中断。
- (8) 具有详细位状态的仲裁丢失中断。
- (9) 单次一短发送 (当错误或仲裁丢失时不重发)。
- (10) 只听模式 (CAN 总线监听, 无应答, 无错误标志)。
- (11) 支持热插 (干扰—自由软件驱动的位置速率检测)。
- (12) 被硬件禁止的 CLKOUT。

2.5.3 BasicCAN 模式

2.5.3.1 BasicCAN 地址配置

SJA1000 对微控制器来说, 是以存储器——映像 I/O 设备出现的。两个设备的独立运行是由类似的 RAM 在片寄存器的实现来保证的。

SJA1000 地址区包括控制段和报文缓冲器。控制段在初始化加载期间可被编程, 以配置通信参数 (例如, 位定时)。CAN 总线上的通信也由微控制器通过该段来控制。在初始化期间, CLKOUT 信号可以被编程为由微控制器决定的一个值。

一个应被发送的报文必须被写入发送缓冲器。在成功接受后，微控制器可从接收缓冲器中读取被接收的报文，然后释放接收缓冲器以作后续使用。

微控制器和 SJA1000 之间状态、控制和命令信号的交换都是在控制段中完成的。初始加载后，接受码和接受屏蔽寄存器、总线定时寄存器 0 和 1，以及输出控制寄存器的内容不应被改变。因此，只有当控制寄存器中的复位请求位被置为高时，这些寄存器才可被访问。

对于寄存器访问，必须加以区别两种不同的模式：①复位模式；②运行模式。

在硬件复位后或控制器进入总线脱离状态时，会自动进入复位模式。运行模式通过控制寄存器中的复位请求位的复位来激活。

BasicCAN 地址分配如表 1.6-6 所示。

表 1.6-6 BasicCAN 地址分配					
CAN 地址	段	运行模式		复位模式	
		读	写	读	写
0	控制	控制	控制	控制	控制
1		(FFH)	命令	(FFH)	命令
2	控制	状态	—	状态	—
3		中断	—	中断	—
4		(FFH)	—	接受码	接受码
5		(FFH)	—	接受屏蔽	接受屏蔽
6		(FFH)	—	总线定时 0	总线定时 0
7		(FFH)	—	总线定时 1	总线定时 1
8		(FFH)	—	输出控制	输出控制
9		测试	测试 ^①	测试	测试 ^①
10	发送缓冲器	标识符(10~3)	标识符(10~3)	(FFH)	—
11		标识符(2~0) RTR 和 DLC	标识符(2~0) RTR 和 DLC	(FFH)	—
12		数据字节 1	数据字节 1	(FFH)	—
13		数据字节 2	数据字节 2	(FFH)	—
14		数据字节 3	数据字节 3	(FFH)	—
15		数据字节 4	数据字节 4	(FFH)	—
16		数据字节 5	数据字节 5	(FFH)	—
17		数据字节 6	数据字节 6	(FFH)	—
18		数据字节 7	数据字节 7	(FFH)	—
19		数据字节 8	数据字节 8	(FFH)	—
20	接收缓冲器	标识符 (10~3)	标识符 (10~3)	标识符 (10~3)	标识符 (10~3)
21		标识符(2~0) RTR 和 DLC	标识符(2~0) RTR 和 DLC	标识符(2~0) RTR 和 DLC	标识符(2~0) RTR 和 DLC
22		数据字节 1	数据字节 1	数据字节 1	数据字节 1
23		数据字节 2	数据字节 2	数据字节 2	数据字节 2
24		数据字节 3	数据字节 3	数据字节 3	数据字节 3
25		数据字节 4	数据字节 4	数据字节 4	数据字节 4
26		数据字节 5	数据字节 5	数据字节 5	数据字节 5
27		数据字节 6	数据字节 6	数据字节 6	数据字节 6
28		数据字节 7	数据字节 7	数据字节 7	数据字节 7
29		数据字节 8	数据字节 8	数据字节 8	数据字节 8

续表					
CAN 地址	段	运行模式		复位模式	
		读	写	读	写
30	接收缓冲器	(FFH)	—	(FFH)	—
31	—	时钟分频器	时钟分频器 ^②	时钟分频器	时钟分频器

注 应该注意的是，寄存器在高 CAN 地址区是被重复的（8 位 CPU 地址的最重要的位是不被译码的，CAN 地址 32 是和 CAN 地址 0 连续的等）。

- ① 测试寄存器只用于产品测试，正常运行中使用这个寄存器会导致不希望的结果。
- ② 某些位仅在复位模式中是可写的（CAN 模式和 CBP）。

2.5.3.2 复位值

检测到复位请求后会中止当前的一个报文接收/发送，并进入复位模式。一旦复位请求位“1—0”跃变，CAN 控制器就返回运行模式。

各寄存器复位模式的配置如表 1.6-7 所示。

表 1.6-7 复位模式的配置					
寄存器	位	符号	名称	值	
				通过硬件复位	通过软件或因总线脱离使 CR.0 位置位
控制	CR.7	—	保留	0	0
	CR.6	—	保留	×	×
	CR.5	—	保留	1	1
	CR.4	OIE	溢出中断使能	×	×
	CR.3	EIE	错误中断使能	×	×
	CR.2	TIE	发送中断使能	×	×
	CR.1	RIE	接收中断使能	×	×
	CR.0	RR	复位请求	1(复位模式)	1(复位模式)
命令	CMR.7	—	保留	①	②
	CMR.6	—	保留		
	CMR.5	—	保留		
	CMR.4	GTS	进入睡眠		
	CMR.3	CDO	清除数据溢出		
	CMR.2	RRB	释放接收缓冲器		
	CMR.1	AT	中止发送		
	CMR.0	TR	发送请求		
状态	SR.7	BS	总线状态	0(总线在线)	×
	SR.6	ES	错误状态	0(OK)	×
	SR.5	TS	发送状态	0(空闲)	0(空闲)
	SR.4	RS	接收状态	0(空闲)	0(空闲)
	SR.3	TCS	发送完成状态	1(完成)	×
	SR.2	TBS	发送缓冲器状态	1(释放)	1(释放)
	SR.1	DOS	数据溢出状态	0(空缺)	0(空缺)
	SR.0	RBS	接收缓冲器状态	0(空)	0(空)
中断	IR.7	—	保留	1	1
	IR.6	—	保留	1	1

续表					
寄存器	位	符号	名 称	值	
				通过硬 件复位	通过软件或 因总线脱离 使 CR.0 位置位
中断	IR.5	—	保留	1	1
	IR.4	WUI	唤醒中断	0(复位)	0(复位)
	IR.3	DOI	数据溢出中断	0(复位)	0(复位)
	IR.2	EI	错误中断	0(复位)	× ^②
	IR.1	TI	发送中断	0(复位)	0(复位)
	IR.0	RI	接收中断	0(复位)	0(复位)
接受码	AC.7—0	AC	接受码	×	×
接受屏蔽	AM.7—0	AM	接受屏蔽	×	×
总线 定时 0	BTR0.7	SJW.1	同步跳转宽度 1	×	×
	BTR0.6	SJW.0	同步跳转宽度 0	×	×
	BTR0.5	BRP.5	波特率 5	×	×
	BTR0.4	BRP.4	波特率 4	×	×
	BTR0.3	BRP.3	波特率 3	×	×
	BTR0.2	BRP.2	波特率 2	×	×
	BTR0.1	BRP.1	波特率 1	×	×
	BTR0.0	BRP.0	波特率 0	×	×
总线 定时 1	BTR1.7	SAM	采样	×	×
	BTR1.6	TSEG2.2	时间段 2.2	×	×
	BTR1.5	TSEG2.1	时间段 2.1	×	×
	BTR1.4	TSEG2.0	时间段 2.0	×	×
	BTR1.3	TSEG1.3	时间段 1.3	×	×
	BTR1.2	TSEG1.2	时间段 1.2	×	×
	BTR1.1	TSEG1.1	时间段 1.1	×	×
	BTR1.0	TSEG1.0	时间段 1.0	×	×
输出控制	OC.7	OCTP1	输出控制 晶体管 P1	×	×
输出控制	OC.6	OCTN1	输出控制 晶体管 N1	×	×
	OC.5	OCPOL1	输出控制极性 1	×	×
	OC.4	OCTP0	输出控制 晶体管 P0	×	×
	OC.3	OCTN0	输出控制 晶体管 N0	×	×
	OC.2	OCPOL0	输出控制极性 0	×	×
	OC.1	OCMODE1	输出控制模式 1	×	×
	OC.0	OCMODE0	输出控制模式 0	×	×
发送缓冲器	—	TXB	发送缓冲器	×	×
接收缓冲器	—	RXB	接收缓冲器	× ^③	× ^③

续表					
寄存器	位	符号	名 称	值	
				通过硬 件复位	通过软件或 因总线脱离 使 CR.0 位置位
时钟分 频器	—	CDR	时钟分频寄存器	00000000 (Intel); 00000101 (Motorola)	×

注 1. 表中“×”表示这些寄存器或位的值不受影响。
2. 表中括号中的注释表示功能含义。
① 读该命令寄存器将总呈现为 2 进制数“11111111”。
② 若使能，总线脱离时错误中断被置位。
③ RXFIFO 的内部读/写指针被复位成其初始值。对 RXB 进行连续读访问会出现未定义的数据值（部分旧报文）。如果一个报文被发送，该报文就会以并行的方式被写入接收缓冲器，但不产生接收中断且接收缓冲器区域是不被锁定的。因此，即使接收缓冲器是空的，最近被发送的报文也可从接收缓冲器被读取，直到它被下一个发送或接收的报文所取代。
一旦硬件复位时，RXFIFO 的指针就会被复位到物理 RAM 地址“0”。通过软件或因总线脱离置位 CR.0，将使 RXFIFO 指针复位到当前的有效 FIFO 起始地址，该地址不同于第一次释放缓冲器命令后的 RAM 地址“0”。

2.5.3.3 控制寄存器（CR）
控制寄存器的内容是用于改变 CAN 控制器的行为的。这些位可以被相连接的微控制器置位或复位，微控制器将控制寄存器作为读/写存储器来使用。
控制寄存器各位的说明见表 1.6-8。

表 1.6-8 控制寄存器各位的说明（CAN 地址 0）				
位	符号	名称	值	功 能
CR.7	—	—	—	保留 ^①
CR.6	—	—	—	保留 ^②
CR.5	—	—	—	保留 ^③
CR.4	OIE	溢出中断使能	1	使能；如果数据溢出位被置位，微控制器接收一个溢出中断信号（也可见状态寄存器）
			0	禁止；微控制器从 SJA1000 接收非溢出中断信号
CR.3	EIE	错误中断使能	1	使能；如果错误或总线状态改变，微控制器接收一个错误中断信号（也可见状态寄存器）
			0	禁止；微控制器从 SJA1000 接收非错误中断信号
CR.2	TIE	发送中断使能	1	使能；当一个报文被成功发送或发送缓冲器可再次被访问时（例如，中止发送命令后），SJA1000 发送一个发送中断信号给微控制器
			0	禁止；微控制器从 SJA1000 接收非发送中断信号
CR.1	RIE	接收中断使能	1	使能；当一个报文被无错接收时，SJA1000 发出一个接收中断信号给微控制器

续表

位	符号	名称	值	功 能
CR.1	RIE	接收中断使能	0	禁止：微控制器从 SJA1000 接收非发送中断信号
CR.0	RR	复位请求①	1	出现：检测到复位请求后，中止当前的一个报文发送/接收并进入复位模式
			0	空缺：在复位请求位“1-0”跃变时，SJA1000 返回运行模式

注 1. 一次总线释放信号（11 个隐性位），如果先前的复位请求是由硬件复位或 CPU 初始复位引起的。
2. 128 次总线释放，如果在重新进入总线在线模式前，先前的复位请求是由 CAN 控制器的初始总线脱离造成的。必须说明的是，如果复位请求位被置位，一些寄存器的值是被修改的（见表 1.6-7）。

- ① 控制寄存器的任何写访问必须设置该位为逻辑 0（复位值是逻辑 0）。
- ② PCA82C200 中这一位是用来选择同步模式。因为这种模式不再被使用，所以这一位的设置不会影响微控制器。又由于软件兼容，这一位是可以被设置的。硬件或软件复位后，这一位将不改变。此外，被用户软件写入的值是可反映的。
- ③ 此位将总呈现逻辑 1。
- ④ 硬件复位期间或总线状态位被置为逻辑 1（总线脱离）时，复位请求位被置为逻辑 1（出现）。如果此位被软件访问，值的变化将变为可视的，而且会在内部时钟的下一个上升沿（内部时钟的频率是外部振荡器频率的 1/2）首次生效。在外部复位期间，微控制器不能将复位请求位置为逻辑 0（空缺）。因此，在将复位请求位置为逻辑 0 后，微控制器必须检查这些位，以确保外部复位引脚不保持为低。复位请求位的变化是同内部分频时钟同步的。读复位请求位能够反映出这种同步状态。复位请求位被置为逻辑 0 后，SJA1000 将会等待。

2.5.3.4 命令寄存器（CMR）

一个命令位起动 SJA1000 传送层内的一个动作。命令寄存器对微控制器来说，是只写存储器。如果对该地址进行读访问，字节“11111111”将被返回。两条命令之间至少需要一个内部时钟周期，内部时钟的频率是外部振荡器频率的 1/2。

命令寄存器各位的说明见表 1.6-9。

表 1.6-9 命令寄存器各位的说明（CMR）（CAN 地址 1）

位	符号	名称	值	功 能
CMR.7	—	—	—	保留
CMR.6	—	—	—	保留
CMR.5	—	—	—	保留
CMR.4	GTS	进入睡眠①	1	睡眠：如果没有 CAN 中断是挂起的，且没有总线活动，SJA1000 进入睡眠状态
			0	唤醒：SJA1000 运行正常
CMR.3	CDO	清除数据溢出②	1	清除：数据溢出状态位被清除
			0	无动作
CMR.2	RRB	释放接收缓冲器③	1	释放：作为 RXFIFO 中报文存储空间的接收缓冲器被释放
			0	无动作
CMR.1	AT	中止发送④	1	出现：如果不是已在进行中，一个挂起的发送请求被取消
			0	空缺：无动作

续表

位	符号	名称	值	功 能
CMR.0	TR	发送请求⑤	1	出现：一个报文将被发送
			0	空缺：无动作

① 如果将睡眠位置为逻辑 1（睡眠），且没有总线活动、没有中断是挂起的，SJA1000 将进入睡眠模式。当至少以上两种情况之一不存在时，即使置位 GTS，也将导致一个唤醒中断。设置成睡眠模式后，CLKOUT 信号持续至少 15 位的时间，以便由这个信号提供时钟的主微控制器在 CLKOUT 信号变低之前进入待机模式。

SJA1000 将被唤醒，当前面提到的三个条件之一被破坏：GTS 被置为低后（唤醒），存在总线活动或 INT 被驱动为低（激活）。一旦唤醒，振荡器即被起动而且一个唤醒中断即被产生。处于睡眠状态的因总线活动而唤醒的 SJA1000 将不能接收报文，直至它检测到 11 个连续的隐性位（总线释放序列）。需要注意的是，在复位模式中，GTS 位是不能被置位的。在清除复位请求后，且再一次检测到总线释放时，GTS 位才可以被第一次置位。

- ② 这个命令位用来清除由数据溢出状态位指出的数据溢出情况。只要数据溢出位被置位，就不再进一步产生数据溢出中断了。在释放接收缓冲器命令的同时，可以发出清除数据溢出命令。
- ③ 读接收缓冲器内容之后，微控制器可以通过设置释放接收缓冲器位为逻辑 1 来释放 RXFIFO 的存储空间。这可使得另一个报文立即变为在接收缓冲器中是可使用的。这时如果使能，会再产生一次接收中断。如果没有其他可用报文，就不会再产生接收中断，且接收缓冲器状态位被清除。
- ④ 中止发送位是在 CPU 要求先前请求的发送暂停时使用的。例如，在发送一个更紧急的报文前，一个已在进行中的发送是不被停止的。为查看原先报文是否被成功发送或中止，应对发送完成状态位进行检测。这应在发送缓冲器状态位被置为逻辑 1（释放）或一个发送中断产生后去做。
- ⑤ 如果发送请求在先前的命令中被置为逻辑 1，它就不能通过设置发送请求位为逻辑 0 而被取消。被请求的发送可通过设置中止发送位为逻辑 1 来取消。

2.5.3.5 状态寄存器（SR）

状态寄存器的内容反映 SJA1000 的状态。状态寄存器对微控制器来说是只读存储器。

状态寄存器各位的说明见表 1.6-10。

表 1.6-10 状态寄存器各位的说明（CAN 地址 2）

位	符号	名称	值	功 能
SR.7	BS	总线状态①	1	总线脱离；SJA1000 不参与总线活动
			0	总线在线；SJA1000 参与总线活动
SR.6	ES	错误状态②	1	错误：至少一个错误计数器已达到或超过 CPU 报警极限
			0	OK；两个错误计数器都在报警极限以下
SR.5	TS	发送状态③	1	发送：SJA1000 正在发送一个报文
			0	空闲：没有报文在发送中
SR.4	RS	接收状态④	1	接收：SJA1000 正在接收一个报文
			0	空闲：没有报文在接收中
SR.3	TCS	发送完成状态⑤	1	完成：最近的请求发送被成功完成
			0	未完成：先前的请求发送仍未被完成
SR.2	TBS	发送缓冲器状态⑥	1	释放：CPU 可以向发送缓冲器写一个报文
			0	锁定：CPU 不能访问发送缓冲器；一个报文正在等待发送或已在处理中

续表

位	符号	名称	值	功 能
SR.1	DOS	数据溢出状态 ^①	1	溢出：一个报文被丢失，因为RXFIFO中没有足够的空间来存储该报文
			0	空缺：自从最后一次清除数据溢出命令被给出，无数据溢出发生
SR.0	RBS	接收缓冲器状态 ^②	1	满：RXFIFO中有一个或多个可用报文
			0	空：无可用报文

- ① 当发送错误计数器超过 255 这一极限 [总线状态位被置为逻辑 1 (总线脱离)], CAN 控制器就会将复位请求位置为逻辑 1 (出现), 且会产生一个错误中断。如果使能。这种状态将持续, 直到 CPU 清除复位请求位。一旦该被完成, CAN 控制器将会等待协议规定的最小时间 (128 次总线释放信号)。总线状态位被清除后 (总线在线), 错误状态位被置为逻辑 0 (OK), 错误计数器被复位且有一个错误中断产生, 如果使能。
- ② 根据 CAN2.0B 协议规范, 在接收或发送期间检测到错误会影响错误计数器。当至少有一个错误计数器达到或超过 CPU 报警极限 (96) 时, 错误状态位被置位。有一个错误中断产生, 如果使能。
- ③ 如果接收状态位和发送状态位都是逻辑 0, 则 CAN 总线是空闲的。
- ④ 无论何时, 发送请求位被置为逻辑 1, 发送完成状态位都会被置为逻辑 0 (未完成)。发送完成状态位将一直保持在逻辑 0, 直到一个报文被成功发送。
- ⑤ 如果 CPU 在发送缓冲器状态位是逻辑 0 (锁定) 时试图写发送缓冲器, 则写入的字节将不被接受, 且会在无提示的情况下丢失。
- ⑥ 当一个将被接收的报文已成功通过接受过滤器 (例如仲裁场后最早出现的), CAN 控制器就需要 RXFIFO 中的空间来存储这个报文的描述符。因此必须有足够的空间用于已被接收的每一个数据字节。如果没有足够的空间来存储这个报文, 这个报文将被丢掉, 且只有在这个被接收的报文直到最后除帧结束的那一位一直没有错误 (报文变为有效) 时, 数据溢出情况才将被指示给 CPU。
- ⑦ 在读存储于 RXFIFO 中的报文且用命令释放接收缓冲器来释放存储空间之后, 此位被清除。如果 FIFO 中还有另一个可用报文, 此位将在下一位的时限 (t_{ack}) 中被重新置位。

2.5.3.6 中断寄存器 (IR)

中断寄存器允许一个中断源的识别。当此寄存器的一位或多位被置位时, \overline{INT} 引脚就被激活 (低)。此寄存器被微控制器读过之后, 所有位被复位, 这会导致 \overline{INT} 上的悬浮电平。中断寄存器对微控制器来说是只读存储器。中断寄存器各位的说明见表 1.6-11。

表 1.6-11 中断寄存器各位的说明 (CAN 地址 3)

位	符号	名称	值	功 能
IR.6	—	—	—	保留 ^①
IR.5	—	—	—	保留 ^①
IR.4	WUI	唤醒中断 ^②	1	置位：脱离睡眠模式时此位被置位
			0	复位：微控制器的任何读访问可清除此位
IR.3	DOI	数据溢出中 ^③	1	置位：当数据溢出中断使能被置为逻辑 1 (使能) 时, 一旦数据溢出状态位 “0—1” 跃变, 此位即被置位
			0	复位：微控制器的任何读访问可清除此位

续表

位	符号	名称	值	功 能
IR.2	EI	错误中断	1	置位：如果错误中断使能被置为逻辑 1 (使能), 在错误状态位或总线状态位变化时, 此位被置位
			0	复位：微控制器的任何读访问可清除此位
IR.1	TI	发送中断	1	置位：无论何时, 发送缓冲器状态从逻辑 0 至逻辑 1 (释放) 变化, 且发送中断使能被置为逻辑 1 (使能), 此位被置位
			0	复位：微控制器的任何读访问可清除此位
IR.0	RI	接收中断 ^④	1	置位：当接收 FIFO 不空且接收中断使能位被置为逻辑 1 (使能) 时, 此位被置位
			0	复位：微控制器的任何读访问可清除此位

- ① 该这一位将总呈现一个逻辑 1。
- ② 如果当 CAN 控制器参与总线活动或 CAN 中断是挂起的时候, CPU 试图设置进入睡眠, 一个唤醒中断也是会产生的。
- ③ 溢出中断位 (如果使能) 和数据溢出状态位是同时被置位的。
- ④ 接收中断位 (如果使能) 和接收缓冲器状态位是同时被置位的。应该注意的是, 接收中断位在读访问时被清除, 即使 FIFO 中还有另一个可用报文。一旦释放接收缓冲器命令被发出, 且接收缓冲器中还有另一个可用报文, 接收中断 (如果使能) 就会在下一个 t_{ack} 被重新置位。

2.5.3.7 发送缓冲器配置

发送缓冲器整体配置示见表 1.6-12。缓冲器用来存储来自微控制器的要被 SJA1000 发送的一个报文, 它可分为描述符和数据场。发送缓冲器只有在运行模式下才可被微控制器写入和读出, 在复位模式下呈现的是 “FFH”。

表 1.6-12 发送缓冲器配置

CAN 地址	场	名称	位							
			7	6	5	4	3	2	1	0
10	描述符	标识符字节 1	ID.10	ID.9	ID.8	ID.7	ID.6	ID.5	ID.4	ID.3
11		标识符字节 2	ID.2	ID.1	ID.0	RTR	DLC.3	DLC.2	DLC.1	DLC.0
12	数据	TX 数据 1	发送数据字节 1							
13		TX 数据 2	发送数据字节 2							
14		TX 数据 3	发送数据字节 3							
15		TX 数据 4	发送数据字节 4							
16		TX 数据 5	发送数据字节 5							
17		TX 数据 6	发送数据字节 6							
18		TX 数据 7	发送数据字节 7							
19		TX 数据 8	发送数据字节 8							

(1) 标识符 (ID)。标识符由 11 位 (ID.10~ID.0) 组成。ID.10 是最重要的位, 在仲裁过程中最先被发送到总线上。标识符作为报文的名称, 它在接收器中用于接受过滤,

也用于在仲裁过程中确定总线访问优先权。标识符的2进制数值越低，其优先权越高，这是由于在仲裁期间较大数目的前导显性位所致。

(2) 远程发送请求 (RTR)。

1) 如果此位被置位，一个远程帧将通过总线被发送。这意味着此帧中不包含数据字节。尽管如此，它需要指定一个正确的取决于具有相同标识符编码的相应数据帧的数据长度码。

2) 如果 RTR 位没有被置位，一个包含由数据长度码指定的数据字节数的数据帧将被发送。

(3) 数据长度码 (DLC)。一个报文数据场中的字节数由数据长度码编码。在一个远程帧发送的开始，由于 RTR 位为逻辑 1 (远程)，数据长度码是不被考虑的。这就迫使被发送/接收的数据字节数为逻辑 0。然而，如果两个 CAN 控制器同时开始一个具有相同标识符的远程帧发送，数据长度码必须被正确指定，以避免总线错误。数据字节计数范围为 0~8 个字节，并被编码为

$$\text{数据字节计数} = 8 \times \text{DLC}.3 + 4 \times \text{DLC}.2 + 2 \times \text{DLC}.1 + \text{DLC}.0$$

为了兼容性，大于 8 的数据长度码不应被使用。如果选择一个大于 8 的值，在具有由 DLC 指定的数据长度码的数据帧中会有 8 个字节被发送。

(4) 数据场。被传送的数据字节数由数据长度码决定。被发送的第一位是地址 12 中数据字节 1 的最重要的位。

2.5.3.8 接收缓冲器

接收缓冲器的整体配置和 2.5.3.7 部分中描述的发送缓冲器很相似。接收缓冲器是 RXFIFO 中可访问的部分，并被设置为 CAN 地址 20~29 之间的范围。

标识符、远程发送请求位和数据长度码，除地址范围为 20~29 之外，其他具有与在发送缓冲器中所描述的含义和配置。

如图 1.6-21 所示，RXFIFO 共有 64 字节的报文空间。在任何特定的时刻，FIFO 中可以存储的报文数取决于各个报文的长度。如果 RXFIFO 中没有足够的空间用于新报文，CAN 控制器就会产生一个数据溢出条件。数据溢出条件存在时，已部分写入 RXFIFO 的一个报文将被删除。这种情况会通过状态寄存器和数据溢出中断指示给微控制器，如果中断使能、且帧直到最后除帧结束的那一位已被无任何错误地接收 (RX 报文变为有效)。

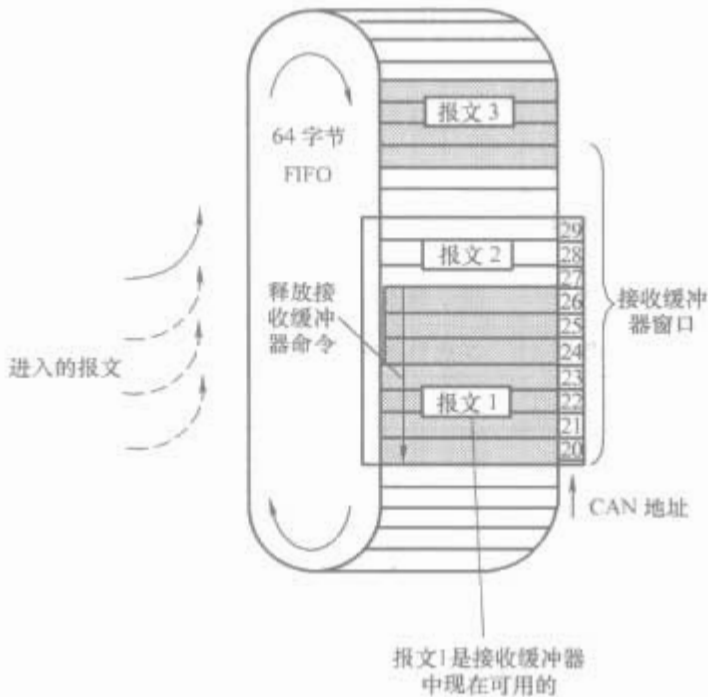


图 1.6-21 RXFIFO 中报文存储示例

2.5.3.9 接受过滤器

在接受过滤器的帮助下，仅当被接收报文的标识符位与接受过滤器寄存器中预定义的位相等时，CAN 控制器才能允许被接收报文进入 RXFIFO。接受过滤器通过接受码寄存器和接受屏蔽寄存器来定义。

(1) 接受码寄存器 (ACR)。接受码寄存器的配置如表 1.6-13 所示。如果复位请求位被置高 (出现)，该寄存器是可以被访问 (读/写) 的。当一个通过接受测试的报文被接收、且存在空的接收缓冲器空间时，则各个描述符和数据场被顺序存储在 RXFIFO 中。当整个报文被正确地接收，就会出现以下结果：

表 1.6-13 ACR 的位分配 (CAN 地址 4)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
AC. 7	AC. 6	AC. 5	AC. 4	AC. 3	AC. 2	AC. 1	AC. 0

1) 接收状态位被置高 (满)。

2) 若接收中断使能位被置高 (使能)，则接收中断被置高 (置位)。

接受码位 (AC. 7~AC. 0) 和报文标识符的 8 个最重要的位 (ID. 10~ID. 3) 必须在被接受屏蔽位 (AM. 7~AM. 0) 标定为相关的那些位的位置上相等。如果下式中所描述的条件被满足，则予以接受：

$$[(\text{ID}. 10 \sim \text{ID}. 3) \equiv (\text{AC}. 7 \sim \text{AC}. 0)] \vee (\text{AM}. 7 \sim \text{AM}. 0) \equiv 11111111$$

(2) 接受屏蔽寄存器 (AMR)。接受屏蔽寄存器的位配置如表 1.6-14 所示。如果复位请求位被置高 (出现)，该寄存器可以被访问 (读/写)。接受屏蔽寄存器限定，接受码与接受滤波的对应位的哪些位是“相关的” (AM. X=0) 或“不予关心的” (AM. X=1)。

表 1.6-14 AMR 位配置 (CAN 地址 5)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
AM. 7	AM. 6	AM. 5	AM. 4	AM. 3	AM. 2	AM. 1	AM. 0

(3) 其他寄存器。其他寄存器在 2.5.5 节予以介绍。

2.5.4 PeliCAN 模式

2.5.4.1 PeliCAN 地址配置

CAN 控制器的内部寄存器对 CPU 来说是以外部寄存器形式编址的在片存储器。由于 CAN 控制器可工作于不同模式 (运行/复位)，所以必须区分不同的内部地址定义。从 CAN 地址 32 起整个内部 RAM (80 字节) 被映像至 CPU 接口。

PeliCAN 地址分配如表 1.6-15 所示。

2.5.4.2 复位值

检测到复位模式位置位后会中止当前的一个报文的发送/接收，并进入复位模式。一旦复位模式位“1—0”跳变，CAN 控制器就返回模式寄存器中确定的模式。

各寄存器复位模式的配置如表 1.6-16 所示。

2.5.4.3 模式寄存器 (MOD)

模式寄存器的内容用于改变 CAN 控制器的行为。这些位可以被 CPU 置位或复位，CPU 将控制寄存器作为读/写存储器使用。保留位被读作逻辑 0。模式寄存器各位的说明见表 1.6-17。

2.5.4.4 命令寄存器 (CMR)

一个命令位起动 CAN 控制器传送层内的一个动作。命令寄存器是只写存储器，当被读时，所有位返回逻辑 0。两条命令之间至少需要一个内部时钟周期，内部时钟的频率是外部振荡器频率的 1/2。

命令寄存器各位的说明见表 1.6-18。

表 1.6-15 Pelican 地址分配

CAN 地址	运 行 模 式				复 位 模 式	
	读		写		读	写
0	模式		模式		模式	模式
1	(00H)		命令		(00H)	命令
2	状态		—		状态	—
3	中断		—		中断	—
4	中断使能		中断使能		中断使能	中断使能
5	保留 (00H)		—		保留 (00H)	—
6	总线定时 0		—		总线定时 0	总线定时 0
7	总线定时 1		—		总线定时 1	总线定时 1
8	输出控制		—		输出控制	输出控制
9	测试		测试①		测试	测试②
10	保留 (00H)		—		保留 (00H)	—
11	仲裁丢失捕捉		—		仲裁丢失捕捉	—
12	误码捕捉		—		误码捕捉	—
13	错误报警极限		—		错误报警极限	错误报警极限
14	RX 错误计数器		—		RX 错误计数器	RX 错误计数器
15	TX 错误		—		TX 错误计数器	TX 错误计数器
16	RX 帧信息 SFF③	RX 帧信息 EFF③	TX 帧信息 SFF③	TX 帧信息 EFF③	接受码 0	接受码 0
17	RX 描述符 1	RX 描述符 1	TX 描述符 1	TX 描述符 1	接受码 1	接受码 1
18	RX 描述符 2	RX 描述符 2	TX 描述符 2	TX 描述符 2	接受码 2	接受码 2
19	RX 数据 1	RX 描述符 3	TX 数据 1	TX 描述符 3	接受码 3	接受码 3
20	RX 数据 2	RX 描述符 4	TX 数据 2	TX 描述符 4	接受屏蔽 0	接受屏蔽 0
21	RX 数据 3	RX 数据 1	TX 数据 3	TX 数据 1	接受屏蔽 1	接受屏蔽 1
22	RX 数据 4	RX 数据 2	TX 数据 4	TX 数据 2	接受屏蔽 2	接受屏蔽 2
23	RX 数据 5	RX 数据 3	TX 数据 5	TX 数据 3	接受屏蔽 3	接受屏蔽 3
24	RX 数据 6	RX 数据 4	TX 数据 6	TX 数据 4	保留 (00H)	—
25	RX 数据 7	RX 数据 5	TX 数据 7	TX 数据 5	保留 (00H)	—
26	RX 数据 8	RX 数据 6	RX 数据 8	RX 数据 6	保留 (00H)	—
27	FIFO RAM④	RX 数据 7	—	TX 数据 7	保留 (00H)	—
28	FIFO RAM④	RX 数据 8	—	TX 数据 8	保留 (00H)	—
29	RX 报文计数器		—		RX 报文计数器	—
30	RX 缓冲器起始地址		—		RX 缓冲器起始地址	—
31	时钟分频器		时钟分频器⑤		时钟分频器	时钟分频器
32	内部 RAM 地址 0 (FIFO)		—		内部 RAM 地址 0	内部 RAM 地址 0
33	内部 RAM 地址 1 (FIFO)		—		内部 RAM 地址 1	内部 RAM 地址 1
↓	↓		↓		↓	↓
95	内部 RAM 地址 63 (FIFO)		—		内部 RAM 地址 63	内部 RAM 地址 63
96	内部 RAM 地址 64 (TX 缓冲器)		—		内部 RAM 地址 64	内部 RAM 地址 64
↓	↓		↓		↓	↓
108	内部 RAM 地址 76 (TX 缓冲器)		—		内部 RAM 地址 76	内部 RAM 地址 76
109	内部 RAM 地址 77 (释放)		—		内部 RAM 地址 77	内部 RAM 地址 77
110	内部 RAM 地址 78 (释放)		—		内部 RAM 地址 78	内部 RAM 地址 78
111	内部 RAM 地址 79 (释放)		—		内部 RAM 地址 79	内部 RAM 地址 79
112	(00H)		—		(00H)	—
↓	↓		↓		↓	↓
127	(00H)		—		(00H)	—

注 寄存器在高 CAN 地址区是被重复的 (8 位 CPU 地址的最重要的位是不被译码的; CAN 地址 128 是和 CAN 地址 0 连续的等)。
① 测试寄存器只用于产品测试。正常运行中使用这个寄存器会导致不希望的结果。
② SFF=标准帧格式。
③ EFF=扩展帧格式。
④ 这些地址分配反映当前报文后的 FIFO RAM 空间。上电后的内容是随机的, 且该内容包含当前报文后的下一个被接收报文的开始。如果不再
有报文被接收, 将会出现部分旧报文。
⑤ 某些位仅在复位模式下 (CAN 模式、CBP、RXINTENH 及时钟关闭) 是可写的。

表 1.6-16 复位模式的配置

寄 存 器	位	符 号	名 称	值	
				通过硬件复位	通过软件或因总线脱离使 MOD.0 置位
模式	MOD.7~MOD.5	—	保留	0 (保留)	0 (保留)
	MOD.4	SM	睡眠模式	0 (唤醒)	0 (唤醒)
	MOD.3	AFM	接受过滤器模式	0 (双)	×
	MOD.2	STM	自测试模式	0 (正常)	×
	MOD.1	LOM	只听模式	0 (正常)	×
	MOD.0	RM	复位模式	1 (出现)	1 (出现)
命令	CMR.7~MOD.5	—	保留	0 (保留)	0 (保留)
	CMR.4	SRR	自接收请求	0 (空缺)	0 (空缺)
	CMR.3	CDO	清除数据溢出	0 (无动作)	0 (无动作)
	CMR.2	RRB	释放接收缓冲器	0 (无动作)	0 (无动作)
	CMR.1	AT	中止发送	0 (空缺)	0 (空缺)
	CMR.0	TR	发送请求	0 (空缺)	0 (空缺)
状态	SR.7	BS	总线状态	0 (总线在线)	×
	SR.6	ES	错误状态	0 (OK)	×
	SR.5	TS	发送状态	1 (等待空闲)	1 (等待空闲)
	SR.4	RS	接收状态	1 (等待空闲)	1 (等待空闲)
	SR.3	TCS	发送完成状态	1 (完成)	×
	SR.2	TBS	发送缓冲器状态	1 (释放)	1 (释放)
	SR.1	DOS	数据溢出状态	0 (空缺)	0 (空缺)
	SR.0	RBS	接收缓冲器状态	0 (空)	0 (空)
中断	IR.7	BEI	总线错误中断	0 (复位)	0 (复位)
	IR.6	ALI	仲裁丢失中断	0 (复位)	0 (复位)
	IR.5	EPI	错误认可中断	0 (复位)	0 (复位)
	IR.4	WUI	唤醒中断	0 (复位)	0 (复位)
	IR.3	DOI	数据溢出中断	0 (复位)	0 (复位)
	IR.2	EI	错误报警中断	0 (复位)	×
	IR.1	TI	发送中断	0 (复位)	0 (复位)
	IR.0	RI	接收中断	0 (复位)	0 (复位)
中断使能	IER.7	BEIE	总线错误中断使能	×	×
	IER.6	ALIE	仲裁丢失中断使能	×	×
	IER.5	EPIE	错误认可中断使能	×	×
	IER.4	WUIE	唤醒中断使能	×	×
	IER.3	DOIE	数据溢出中断使能	×	×
	IER.2	EIE	错误报警中断使能	×	×
	IER.1	TIE	发送中断使能	×	×
	IER.0	RIE	接收中断使能	×	×
总线定时 0	BTR0.7	SJW.1	同步跳转宽度 1	×	×
	BTR0.6	SJW.0	同步跳转宽度 0	×	×
	BTR0.5	BRP.5	波特率 5	×	×

续表

寄 存 器	位	符 号	名 称	值	
				通过硬件复位	通过软件或因总线脱离使 MOD.0 置位
总线定时 0	BTR0.4	BRP.4	波特率 4	×	×
	BTR0.3	BRP.3	波特率 3	×	×
	BTR0.2	BRP.2	波特率 2	×	×
	BTR0.1	BRP.1	波特率 1	×	×
	BTR0.0	BRP.0	波特率 0	×	×
总线定时 1	BTR1.7	SAM	采样	×	×
	BTR1.6	TSEG2.2	时间段 2.2	×	×
	BTR1.5	TSEG2.1	时间段 2.1	×	×
	BTR1.4	TSEG2.0	时间段 2.0	×	×
	BTR1.3	TSEG1.3	时间段 1.3	×	×
	BTR1.2	TSEG1.2	时间段 1.2	×	×
	BTR1.1	TSEG1.1	时间段 1.1	×	×
	BTR1.0	TSEG1.0	时间段 1.0	×	×
输出控制	OCR.7	OCTP1	输出控制晶体管 P1	×	×
	OCR.6	OCTN1	输出控制晶体管 N1	×	×
	OCR.5	OCPOL1	输出控制极性 1	×	×
	OCR.4	OCTP0	输出控制晶体管 P0	×	×
	OCR.3	OCTN0	输出控制晶体管 N0	×	×
	OCR.2	OCPOL0	输出控制极性 0	×	×
	OCR.1	OCMODE1	输出控制模式 1	×	×
	OCR.0	OCMODE0	输出控制模式 0	×	×
仲裁丢失捕捉	—	ALC	仲裁丢失捕捉	0	×
误码捕捉	—	ECC	误码捕捉	0	×
错误报警极限	—	EWLR	错误报警极限寄存器	96	×
RX 错误计数器	—	RXERR	接收错误计数器	0 (复位)	× ^②
TX 错误计数器	—	TXERR	发送错误计数器	0 (复位)	× ^②
TX 缓冲器	—	TXB	发送缓冲器	×	×
RX 缓冲器	—	RXB	接收缓冲器	× ^③	× ^③
ACR0~ACR3	—	ACR0~ACR3	接受码寄存器	×	×
AMR0~AMR3	—	AMR0~AMR3	接受屏蔽寄存器	×	×
RX 报文计数器	—	RMC	RX 报文计数器	0	0
RX 缓冲器起始地址	—	RBSA	RX 缓冲器起始地址	00000000	×
时钟分频器	—	CDR	时钟分频寄存器	00000000Intel; 00000101Motorola	×

注 1. 表中“×”表示这些寄存器或位的值不受影响。
2. 表中括号中的注释表示功能含义。
① 总线脱离时错误报警中断被置位，若使能。
② 若由于总线脱离而进入复位模式，接收错误计数器被清除且发送错误计数器被初始化为 127 来倒计时被定义的 CAN 总线脱离恢复时间（11 个连续隐性位出现 128 次）。
③ RXFIFO 的内部读/写指针被复位或其初始值。对 RXB 进行连续读访问会出现未定义的数据值（部分旧报文）。如果一个报文被发送，该报文就会以并行的方式被写入接收缓冲器。只有该发送由自接收请求迫使，才会产生一个接收中断。因此，即使接收缓冲器是空的，最近被发送的报文也可从接收缓冲器被读取，直到它被下一个发送或接收的报文所取代。一旦硬件复位，RXFIFO 的指针就会被复位至物理 RAM 地址“0”。通过软件或因总线脱离置位 CR.0，将使 RXFIFO 指针复位到当前的有效 FIFO 起始地址（RBSA 寄存器），该地址不同于第一次释放接收缓冲器命令后的 RAM 地址“0”。

表 1.6-17 模式寄存器 (MOD) 各位的说明 (CAN 地址 0)

位	符号	名称	值	功 能
MOD. 7	—	—	—	保留
MOD. 6	—	—	—	保留
MOD. 5	—	—	—	保留
MOD. 4	SM	睡眠模式 ^①	1	睡眠：如果没有 CAN 中断是挂起的，且没有总线活动，CAN 控制器进入睡眠模式
			0	唤醒：CAN 控制器唤醒，若处于睡眠状态
MOD. 3	AFM	接受过滤器模式 ^②	1	单：单接受过滤器选择被使能（一个 32 位长的过滤器是激活的）
			0	双：双接受过滤器选择被使能（两个 16 位长的过滤器是激活的）
MOD. 2	STM	自测试模式 ^③	1	自测试：在此模式下，若总线上没有其他激活节点，使用自接收请求命令，整个节点测试是可能的；CAN 控制器将实现一个成功发送，即使无应答被接收
			0	正常：成功发送必须有应答
MOD. 1	LOM	只听模式 ^{④⑤}	1	只听：在此模式下，即使一个报文被成功接收，CAN 控制器也不向 CAN 总线发应答信号；错误计数器停止在当前值
			0	正常
MOD. 0	RM	复位模式 ^⑥	1	复位：检测到置复位请求位后，中止当前的一个报文发送/接收并进入复位模式
			0	正常：在复位模式位“1—0”跃变时，CAN 控制器返回运行模式

- ① SJA1000 将进入睡眠模式，如果将睡眠模式位置为逻辑 1（睡眠），且没有总线活动、没有中断是挂起的。当至少这两种情况之一不存在时，即使置位 SM，也将导致一个唤醒中断。设置成睡眠模式后，CLKOUT 信号持续至少 15 位的时间，以便由这个信号提供时钟的主微控制器在 CLKOUT 信号变低之前进入待机模式。SJA1000 将被唤醒，当前面提到的三个条件之一被破坏：SM 被置为低后（唤醒），存在总线活动或 INT 被驱动为低（激活）。一旦唤醒，振荡器即被起动而且一个唤醒中断即被产生。处于睡眠状态的因总线活动而被唤醒的 SJA1000 将不能接收报文，直至它检测到 11 个连续的隐性位（总线释放序列）。需要注意的是，在复位模式中，SM 位是不能被置位的。在清除复位请求后，且再一次检测到总线释放时，SM 位才可以被第一次置位。
- ② 如果提前进入复位模式，才可以对 MOD. 1~MOD. 3 位进行写访问。
- ③ 此运行模式使 CAN 控制器进入错误认可状态。报文发送是不可能的。只听模式可用在诸如软件驱动位速率检测和“热插”等方面。所有其他功能都像在正常模式中一样被使用。
- ④ 在硬件复位期间或总线状态位被置为逻辑 1（总线脱离）时，复位模式位被置为逻辑 1（出现）。如果此位被软件访问，则值的变化将变为可视的，而且会在内部时钟的下一个上升沿（内部时钟的频率是外部振荡器频率的 1/2）首次生效。在外部复位期间，微控制器不能将复位模式位置为逻辑 0（空缺）。因此，在将复位模式位置为逻辑 1 后，微控制器必须检查此位，以确保外部复位引脚不保持为高。复位请求位的变化是同内部分频时钟同步的。读复位请求位能够反映出这种同步状态。复位模式位被置为逻辑 0 后，SJA1000 将会等待。

表 1.6-18 命令寄存器 (CMR) 各位的说明 (CAN 地址 1)

位	符号	名称	值	功 能
CMR. 7	—	保留	—	—
CMR. 6	—	保留	—	—
CMR. 5	—	保留	—	—
CMR. 4	SRR	自接收请求 ^{①②}	1	出现：一个报文将同时被发送和接收
			0	—（空缺）
CMR. 3	CDO	清除数据溢出 ^③	1	清除：数据溢出状态位被清除
			0	—（无动作）
CMR. 2	RRB	释放接收缓冲器 ^④	1	释放：作为 RXFIFO 中报文存储器空间的接收缓冲器被释放
			0	—（无动作）
CMR. 1	AT	中止发送 ^{⑤⑥}	1	出现：如果不是已在进行中，一个挂起的发送请求被取消
			0	—（空缺）

续表

位	符号	名称	值	功 能
CMR. 0	TR	发送请求 ^{⑦⑧}	1	出现：一个报文将被发送
			0	—（空缺）

- ① 在自接收请求时，一个报文被发送且同时被接收，如果接受过滤器被置为相应的标识符。一个接收中断和一个发送中断将指示正确的自接收（也可见模式寄存器中自测试模式）。
- ② 同时置命令位 CMR. 0 和 CMR. 1 会产生一次报文发送。当出现错误或仲裁丢失时，将不执行重发送（单次短发送）。同时置命令位 SMR. 4 和 SMR. 1 会导致一次自接收特性的报文发送。当出现错误或仲裁丢失时，将不执行重发送。同时置命令位 CMR. 0、CMR. 1 和 CMR. 4，如同 CMR. 0 和 CMR. 1 一样，会导致一次报文发送。一旦状态寄存器中的发送状态位被置位，内部发送请求位将自动被清除。同时置位 CMR. 0 和 CMR. 4 将忽略 CMR. 4 的置位。
- ③ 这个命令位用来清除由数据溢出状态位指出的数据溢出情况。只要数据溢出状态位被置位，就不再进一步产生数据溢出中断。
- ④ 读接收缓冲器内容之后，CPU 可以通过设置释放接收缓冲器位为逻辑 1 来释放 RXFIFO 的这个存储空间。这将导致另一个报文立即变为在接收缓冲器中是可使用的。如果没有其他可用报文，接收中断位被复位。
- ⑤ 中止发送位是在 CPU 要求先前请求的发送暂停时使用的，例如在发送一个更紧急的报文前，一个已在进行中的发送是不被停止的。为查看原先报文是否被成功发送或中止，应对发送完成状态位进行检测。这应在发送缓冲器状态位被置为逻辑 1 或一个发送中断产生后去做。应当注意的是，若因发送缓冲器状态位变为“释放”而使发送被中断，将产生一个发送中断。
- ⑥ 如果发送请求在先前的命令中被置为逻辑 1，它就不能通过设置发送请求位为逻辑 0 而被取消。被请求的发送可通过设置中止发送位为逻辑 1 来取消。

2.5.4.5 状态寄存器 (SR)

状态寄存器的内容反映 CAN 控制器的状态。状态寄存器对 CPU 来说是只读存储器。状态寄存器各位的说明见表 1.6-19。

表 1.6-19 状态寄存器 (SR) 各位的说明 (CAN 地址 2)

位	符号	名称	值	功 能
SR. 7	BS	总线状态 ^①	1	总线脱离；CAN 控制器不参与总线活动
			0	总线在线；CAN 控制器参与总线活动
SR. 6	ES	错误状态 ^②	1	错误；至少一个错误计数器已达到或超过由错误报警极限寄存器 (EWLR) 确定的 CPU 报警极限
			0	OK；两个错误计数器都在报警极限以下
SR. 5	TS	发送状态 ^③	1	发送；CAN 控制器正在发送一个报文
			0	空闲
SR. 4	RS	接收状态 ^④	1	接收；CAN 控制器正在接收一个报文
			0	空闲
SR. 3	TCS	发送完成状态 ^⑤	1	完成；最近请求发送被成功完成
			0	未完成；先前的请求发送仍未被完成
SR. 2	TBS	发送缓冲器状态 ^⑥	1	释放；CPU 可以向发送缓冲器写一个报文
			0	锁定；CPU 不能访问发送缓冲器；一个报文正在等待发送或已在处理中
SR. 1	DOS	数据溢出状态 ^⑦	1	溢出；一个报文被丢失，因为 RXFIFO 中没有足够的空间来存储该报文
			0	空缺；自从最后一次给出清除数据溢出命令，无数据溢出发生
SR. 0	RBS	接收缓冲器状态 ^⑧	1	满；RXFIFO 中有一个或更多可用报文
			0	空；无可用报文

① 当发送错误计数器超过 255 这一极限，总线状态位被置为逻辑 1 (总线脱离)，CAN 控制器就会将复位模式位置为逻辑 1 (出现)，且会有一个错误报警中断产生，如果使能。发送错误计数器被置为 127，且接收错误计数器被清除。这种状态将持续，直到 CPU 清除复位模式位。一旦这被完成，CAN 控制器将等待协议规定的最小时间 (128 次总线释放信号)，来倒计发送错误计数器。总线状态位被清除后 (总线在线)，错误状态位被置为逻辑 0 (OK)，错误计数器被复位且有一个错误报警中断产生，如果使能。在这期间，读 TX 错误计数器会得到总线脱离恢复的状态信息。

② 根据 CAN 2.0B 协议规范，在接受或发送期间检测到错误会影响错误计数器。当至少有一个错误计数器达到或超过 CPU 报警极限 (EWLR) 时，错误状态位被置位。有一个错误报警中断产生，如果使能。硬件复位后 EWLR 的默认值是 96。

③ 如果接收状态位和发送状态位都是逻辑 0 (空闲)，则 CAN 总线是空闲的。如果两个位都被置位，则控制器将等待再次空闲。硬件复位后，必须检测到 11 个连续的隐性位，直到达到空闲状态。总线脱离后，将产生 128 次 11 个连续的隐性位。

④ 无论何时，发送请求位或自接收请求位被置为逻辑 1，发送完成状态位都会被置为逻辑 0 (未完成)。发送完成状态位将一直保持在逻辑 0，直到一个报文被成功发送。

⑤ 如果 CPU 在发送缓冲器状态位是逻辑 0 (锁定) 时试图写发送缓冲器，则写入的字节将不被接受且会在无提示的情况下丢失。

⑥ 当一个将被接收的报文已成功地通过接受过滤器，CAN 控制器就需要 RXFIFO 中的空间来存储这个报文的描述符和已被接收的每个数据字节。如果没有足够的空间来存储这个报文，此报文将被丢掉，且只有在报文变为有效时，数据溢出情况才将被指示给 CPU。如果此报文未被成功完成 (例如由于错误)，则数据溢出情况是不被指示的。

⑦ 在读存储于 RXFIFO 中的报文且用命令释放接收缓冲器来释放存储空间之后，此位被清除。

2.5.4.6 中断寄存器 (IR)

中断寄存器允许一个中断源的识别。当此寄存器的一位或多位被置位时，CAN 中断将被指示给 CPU。此寄存器被 CPU 读过之后，除接收中断位的所有位被复位。中断寄存器对 CPU 来说作为只读存储器。中断寄存器各位的说明见表 1.6-20。

表 1.6-20 中断寄存器 (IR) 各位的说明 (CAN 地址 3)

位	符号	名称	值	功 能
IR. 7	BEI	总线错误中断	1	置位；当 CAN 控制器在 CAN 总线上检测到一个错误，且中断使能寄存器的 BEIE 位被置位时，此位被置位
			0	复位
IR. 6	ALI	仲裁丢失中断	1	置位；当 CAN 控制器丢失仲裁变成一个接收器，且中断使能寄存器的 ALIE 位被置位时，此位被置位
			0	复位
IR. 5	EPI	错误认可中断	1	置位；只要 CAN 控制器已达到错误认可状态 (至少一个错误计数器超过协议规定的值 127)，或如果 CAN 控制器在错误认可状态，并再次进入错误激活状态，且中断使能寄存器的 EPIE 位被置位时，此位被置位
			0	复位
IR. 4	WUI	唤醒中断 ^①	1	置位；当 CAN 控制器处于睡眠状态，检测到总线活动，且中断使能寄存器的 EPIE 位被置位时，此位被置位
			0	复位
IR. 3	DOI	数据溢出中断	1	置位；一旦数据溢出状态位“0—1”跃变，且中断使能寄存器的 DOIE 位被置位，此位被置位
			0	复位
IR. 2	EI	错误报警中断	1	置位；一旦错误状态位或总线状态位每一次变化 (置位和清除)，且中断使能寄存器的 EIE 位被置位，此位被置位
			0	复位
IR. 1	TI	发送中断	1	置位；只要发送缓冲器状态从逻辑 0 至逻辑 1 (释放) 变化，且中断使能寄存器的 TIE 位被置位，此位被置位
			0	复位
IR. 0	RI	接收中断 ^②	1	置位；当接收 FIFO 不空且 RIE 位在中断使能寄存器中被置位时，此位被置位
			0	复位；在 RXFIFO 中无其他可用报文

① 如果当 CAN 控制器参与总线活动或 CAN 中断是挂起的时候，CPU 试图设置进入睡眠，一个唤醒中断会产生。

② 除了 RI 依赖相应的中断使能位 (RIE) 外，此位的行为与接收缓冲器状态位是等效的。因此，在读访问中断寄存器时，接收中断位不被清除。给出“释放接收缓冲器”命令将暂时清除 RI。一旦释放命令被发出，且 FIFO 中还有另一个可用报文，则 RI 被重新置位。否则 RI 仍被清除。

2.5.4.7 中断使能寄存器 (IER)

此寄存器允许使能被指示给 CPU 的不同类型的中断源。中断使能寄存器对 CPU 来说是读/写存储器。中断使能寄存器各位的说明见表 1.6-21。

表 1.6-21 中断使能寄存器 (IER) 各位的说明 (CAN 地址 4)

位	符号	名称	值	功 能
IER. 7	BEIE	总线错误中断使能	1	使能; 如果检测到一个总线错误, CAN 控制器请求各自的中断
			0	禁止
IER. 6	ALIE	仲裁丢失中断使能	1	使能; 如果 CAN 控制器丢失仲裁, 各自的中断被请求
			0	禁止
IER. 5	EPIE	错误认可中断使能	1	使能; 如果 CAN 控制器的错误状态改变, 从错误激活到错误认可或相反, 各自的中断被请求
			0	禁止
IER. 4	WUIE	唤醒中断使能	1	使能; 如果睡眠中的 CAN 控制器唤醒, 各自的中断被请求
			0	禁止
IER. 3	DOIE	数据溢出中断使能	1	使能; 如果数据溢出状态位被置位 (见状态寄存器), CAN 控制器请求各自的中断
			0	禁止
IER. 2	EIE	错误报警中断使能	1	使能; 如果错误或总线状态变化 (见状态寄存器), CAN 控制器请求各自的中断
			0	禁止
IER. 1	TIE	发送中断使能	1	使能; 当一个报文被成功发送或发送缓冲器可再次被访问时 (例如, 中止发送命令后), CAN 控制器请求各自的发送
			0	禁止

续表

位	符号	名称	值	功 能
IER. 0	RIE	接收中断使能①	1	使能; 当发送缓冲器状态是“满”时, CAN 控制器请求各自的中断
			0	禁止

① 接收中断使能位直接影响接收中断位和外部中断输出 NIT。如果 RIE 被清除, 则外部的 NIT 引脚立即变为高, 如果没有其他的中断是挂起的。

2.5.4.8 仲裁丢失捕捉寄存器 (ALC)

此寄存器包含丢失仲裁的位地址信息, 仲裁丢失捕捉寄存器对 CPU 来说作为只读存储器。保留位被读作逻辑 0。仲裁丢失捕捉寄存器各位的说明见表 1.6-22。

表 1.6-22 仲裁丢失捕捉寄存器 (ALC) 各位的说明 (CAN 地址 11)

位	符号	名称	值	功能
LC. 7~ALC. 5	—	保留		值和功能见表 1.6-23
ALC. 4	BITNO4	第 4 位		
ALC. 3	BITNO3	第 3 位		
ALC. 2	BITNO2	第 2 位		
ALC. 1	BITNO1	第 1 位		
ALC. 0	BITNO0	第 0 位		

仲裁丢失时, 会产生对应的仲裁丢失中断, 如果使能。同时, 位流处理器中的当前位的位置被捕捉至仲裁丢失捕捉寄存器。此寄存器中的内容是固定的, 直到用户软件读出它的内容一次。然后捕捉机构被再次激活。

在对中断寄存器读访问期间, 位于中断寄存器中的对应的中断标志被清除。直到仲裁丢失捕捉寄存器被一次读出, 一个新的仲裁丢失中断才可能发生。

仲裁丢失位数的说明分别如图 1.6-22 和图 1.6-23 所示。

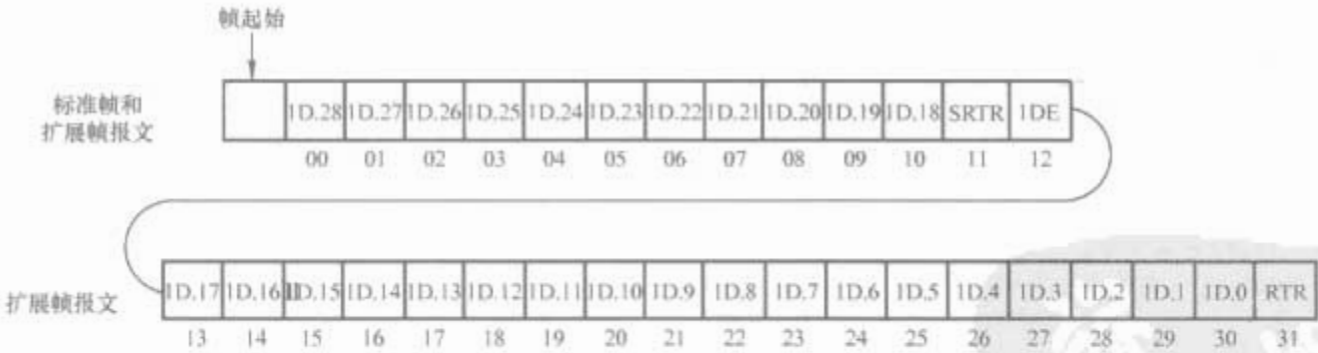


图 1.6-22 仲裁丢失位数的说明

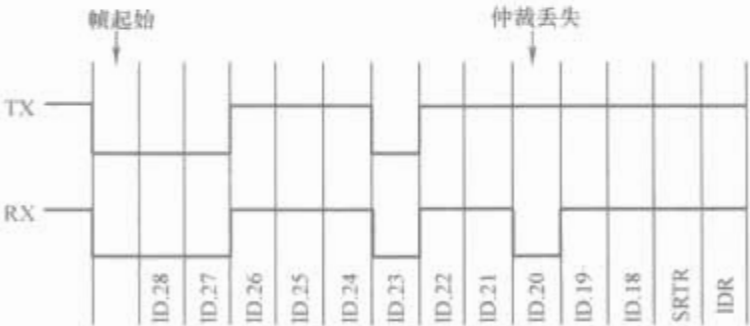


图 1.6-23 仲裁丢失位数的说明举例 (结果: ALC=08)

仲裁丢失捕捉寄存器 ALC. 4~ALC. 0 位的功能见表 1.6-23。

表 1.6-23 仲裁丢失捕捉寄存器 ALC. 4~ALC. 0 位的功能

位					十进制数	功 能
ALC. 4	ALC. 3	ALC. 2	ALC. 1	ALC. 0		
0	0	0	0	0	00	在描述符位 1 仲裁丢失
0	0	0	0	1	01	在描述符位 2 仲裁丢失
0	0	0	1	0	02	在描述符位 3 仲裁丢失
0	0	0	1	1	03	在描述符位 4 仲裁丢失

续表

位					十进制数	功 能
ALC. 4	ALC. 3	ALC. 2	ALC. 1	ALC. 0		
0	0	1	0	0	04	在描述符位 5 仲裁丢失
0	0	1	0	1	05	在描述符位 6 仲裁丢失
0	0	1	1	0	06	在描述符位 7 仲裁丢失
0	0	1	1	1	07	在描述符位 8 仲裁丢失
0	1	0	0	0	08	在描述符位 9 仲裁丢失
0	1	0	0	1	09	在描述符位 10 仲裁丢失
0	1	0	1	0	10	在描述符位 11 仲裁丢失
0	1	0	1	1	11	在 SRTR 位仲裁丢失 ^①
0	1	1	0	0	12	在 IDE 位仲裁丢失
0	1	1	0	1	13	在描述符位 12 仲裁丢失 ^②
0	1	1	1	0	14	在描述符位 13 仲裁丢失 ^②
0	1	1	1	1	15	在描述符位 14 仲裁丢失 ^②
1	0	0	0	0	16	在描述符位 15 仲裁丢失 ^②
1	0	0	0	1	17	在描述符位 16 仲裁丢失 ^②
1	0	0	1	0	18	在描述符位 17 仲裁丢失 ^②
1	0	0	1	1	19	在描述符位 18 仲裁丢失 ^②
1	0	1	0	0	20	在描述符位 19 仲裁丢失 ^②
1	0	1	0	1	21	在描述符位 20 仲裁丢失 ^②
1	0	1	1	0	22	在描述符位 21 仲裁丢失 ^②
1	0	1	1	1	23	在描述符位 22 仲裁丢失 ^②
1	1	0	0	0	24	在描述符位 23 仲裁丢失 ^②
1	1	0	0	1	25	在描述符位 24 仲裁丢失 ^②
1	1	0	1	0	26	在描述符位 25 仲裁丢失 ^②
1	1	0	1	1	27	在描述符位 26 仲裁丢失 ^②
1	1	1	0	0	28	在描述符位 27 仲裁丢失 ^②
1	1	1	0	1	29	在描述符位 28 仲裁丢失 ^②
1	1	1	1	0	30	在描述符位 29 仲裁丢失 ^②
1	1	1	1	1	31	在 RTR 位仲裁丢失 ^②

注 二进制码表示仲裁丢失帧位数的编号。
① RTR 位为标准帧报文。
② 仅为扩展帧报文。

2.5.4.9 误码捕捉寄存器(ECC)

此寄存器包含总线上错误的类型和位置信息。误码捕捉寄存器对 CPU 来说是只读存储器。误码捕捉寄存器各位的说明见表 1.6-24。

表 1.6-24 误码捕捉寄存器(ECC)各位的说明(CAN 地址 12)

位	符号	名称	值	功 能
ECC. 7(1)	ERRC1	误码 1	—	—
ECC. 6(1)	ERRC0	误码 0	—	—
ECC. 5	DIR	指示	1	RX: 在接收期间出现错误
			0	TX: 在发送期间出现错误
ECC. 4(2)	SEG4	段 4	—	—
ECC. 3(2)	SEG3	段 3	—	—
ECC. 2(2)	SEG2	段 2	—	—
ECC. 1(2)	SEG1	段 1	—	—
ECC. 0(2)	SEG0	段 0	—	—

注 1. ECC. 7 和 ECC. 6 位的说明见表 1.6-25。
2. ECC. 4~ECC. 0 位的说明见表 1.6-26。

表 1.6-25 ECC. 7 和 ECC. 6 位的说明

ECC. 7 位	ECC. 6 位	功 能
0	0	位错误
0	1	形式错误
1	0	填充错误
1	1	其他类型错误

表 1.6-26 ECC. 4~ECC. 0 各位的说明

ECC. 4	ECC. 3	ECC. 2	ECC. 1	ECC. 0	功 能
0	0	0	1	1	帧起始
0	0	0	1	0	ID. 28~ID. 21
0	0	1	1	0	ID. 20~ID. 18
0	0	1	0	0	SRTR 位
0	0	1	0	1	IDE 位
0	0	1	1	1	ID. 17~ID. 13
0	1	1	1	1	ID. 12~ID. 5
0	1	1	1	0	ID. 4~ID. 0
0	1	1	0	0	RTR 位
0	1	1	0	1	保留位 1
0	1	0	0	1	保留位 0
0	1	0	1	1	数据长度码
0	1	0	1	0	数据场
0	1	0	0	0	CRC 序列
1	1	0	0	0	CRC 界定符
1	1	0	0	1	应答间隙
1	1	0	1	1	应答界定符
1	1	0	1	0	帧结束
1	0	0	1	0	间断
1	0	0	0	1	激活错误标志
1	0	1	1	0	认可错误标志
1	0	0	1	1	显性位误差
1	0	1	1	1	错误界定
1	1	1	0	0	溢出标志

注 1. 位的设置反映当前帧段的不同错误事件。如果一个总线错误发生，将产生对应的总线错误中断，如果使能。同时，位流处理器的当前位置被捕捉至误码捕捉寄存器。
2. 此寄存器中的内容是固定的，直到用户软件读出它的内容一次，捕捉机构被再次激活。在读访问中断寄存器期间，中断寄存器中的对应的中断标志被清除。直到捕捉寄存器被读出一次，一个新的总线错误中断才是可能的。

2.5.4.10 错误报警极限寄存器(EWLR)

错误报警极限在此寄存器中被定义。默认值(硬件复位后)是 96。在复位模式下，此寄存器对 CPU 来说是读/写存储器。在运行模式中，是只读存储器。错误报警极限寄存器各位的说明见表 1.6-27。

注意：只有提前进入复位模式，EWLR 中的内容才可能发生变化。由新寄存器内容引起的错误状态变化(见状态寄存器，表 1.6-19)和错误报警中断才可能发生，直到复位模式被再次取消。

表 1.6-27 错误报警极限寄存器(EWLR)各位的说明(CAN 地址 13)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
EWL. 7	EWL. 6	EWL. 5	EWL. 4	EWL. 3	EWL. 2	EWL. 1	EWL. 0

2.5.4.11 RX 错误计数寄存器(RXERR)

RX 错误计数寄存器呈现接收错误计数器的当前值。硬件复位后,此寄存器被初始化为逻辑 0。在运行模式下,此寄存器对 CPU 来说作为只读存储器。只有在复位模式下,才可能对此寄存器进行读访问。

如果出现总线脱离, RX 错误计数器被初始化为逻辑 0。总线脱离时间是有效的,写此寄存器无效。

注意:只有提前进入复位模式, CPU 才可能使 RX 错误计数器的内容发生变化。直到复位模式被再次取消,由新寄存器内容引起的错误状态变化(见状态寄存器,表 1.6-19),错误报警及错误认可中断才能发生。

RX 错误计数器寄存器各位的说明见表 1.6-28。

表 1.6-28 RX 错误计数器寄存器(RXERR)各位的说明
(CAN 地址 14)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
RXERR.7	RXERR.6	RXERR.5	RXERR.4	RXERR.3	RXERR.2	RXERR.1	RXERR.0

2.5.4.12 TX 错误计数寄存器(TXERR)

TX 错误计数器呈现发送错误计数器的当前值。在运行模式下,此寄存器对 CPU 来说作为只读存储器。只有在复位模式下,才可对此寄存器进行读访问。硬件复位后,此寄存器被初始化为逻辑 0。如果总线脱离事件发生, TX 错误计数器被初始化为 127,来计算协议规定的最小时间(128 次总线空闲信号)。在此期间,读 TX 错误计数器给出关于总线脱离恢复的状态信息。

如果总线脱离是激活的,写访问 TXERR 的 0~254 区域将清除总线脱离标志,且在复位模式被清除后,控制器将等待一个连续的 11 位隐性位(总线释放)。

TX 错误计数寄存器各位的说明见表 1.6-29。

表 1.6-29 TX 错误计数寄存器(TXERR)各位的说明
(CAN 地址 15)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
TXERR.7	TXERR.6	TXERR.5	TXERR.4	TXERR.3	TXERR.2	TXERR.1	TXERR.0

对 TXERR 写 255 允许初始化一个由 CPU 驱动的总线脱离事件。应该注意的是,只有提前进入复位模式, CPU 才可能使 TX 错误计数器中的内容发生变化。直到复位模式被再次取消,由新寄存器内容引起的错误状态或总线状态的变化(见状态寄存器,表 1.6-19),错误报警及错误认可中断才能发生。离开复位模式后,新的 TX 计数器内容起作用,且总线脱离以同样的方式被执行,好像它是由总线错误引起的。也就是说,再次进入复位模式, TX 错误计数器被初始化为 127, RX 计数器被清除且所有相关的状态位和中断寄存器位被置位。

清除复位模式将执行协议规定的总线脱离恢复序列(等待 128 次总线释放信号)。如果在总线脱离恢复结束前(TXERR>0)再次进入复位模式,总线脱离是激活的,且 TXERR 被冻结。

2.5.4.13 发送缓冲器

发送缓冲器整体配置见图 1.6-24。必须区分标准帧格式(SFF)和扩展帧格式(EFF)的配置。发送缓冲器允许定义最长为 8 个数据字节的发送报文。

(1) 发送缓冲器配置。发送缓冲器被分为描述符场和数据场:描述符场的第一个字节是帧信息字节(帧信息),它描述帧格式(SFF 或 EFF)、远程帧或数据帧及数据长度,它有



图 1.6-24 标准帧格式和扩展帧格式的发送缓冲器配置
(a)标准帧格式; (b)扩展帧格式

2 个 SFF 描述符字节或 4 个 EFF 报文字节;数据场最多包含 8 个数据字节。发送缓冲器有 13 个字节长,并位于 CAN 地址的 16~28 范围。注意:使用 CAN 地址空间的 96~108 可直接访问发送缓冲器的 RAM。RAM 区域为发送缓冲器保留。CAN 地址 109、110 和 111 3 个字节是通用的。

(2) 发送缓冲器的描述场。发送缓冲器位配置见表 1.6-30~表 1.6-32(SFF)和表 1.6-33~表 1.6-38(EFF)。所选配置与接收缓冲器配置兼容。

表 1.6-30 TX 帧信息(SFF)(CAN 地址 16)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
FF ^①	RTR ^②	X ^③	X ^③	DLC. 3 ^④	DLC. 2 ^④	DLC. 1 ^④	DLC. 0 ^④

- ① 帧格式。
- ② 远程发送请求。
- ③ 不予关心的;如果使用自接收功能(自测试),建议与接收缓冲器(0)兼容。
- ④ 数据长度码位。

表 1.6-31 TX 标识符 1(SFF)(CAN 地址 17)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 28	ID. 27	ID. 26	ID. 25	ID. 24	ID. 23	ID. 22	ID. 21

注 ID. X 表示标识符位 X。

表 1.6-32 TX 标识符 2(SFF)(CAN 地址 18)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 20	ID. 19	ID. 18	X ^①	X ^②	X ^②	X ^②	X ^②

- 注 ID. X 表示标识符位 X。
- ① 不予关心的;如果使用自接收功能(自测试),建议与接收缓冲器(RTR)兼容。
- ② 不予关心的;如果使用自接收功能(自测试),建议与接收缓冲器(0)兼容。

表 1.6-33 TX 帧信息(EFF)(CAN 地址 16)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
FF ^①	RTR ^②	X ^③	X ^③	DLC. 3 ^④	DLC. 2 ^④	DLC. 1 ^④	DLC. 0 ^④

- ① 帧格式。
- ② 远程发送请求。
- ③ 不予关心的;如果使用自接收功能(自测试),建议与接收缓冲器(0)兼容。
- ④ 数据长度码位。

表 1.6-34 TX 标识符 1(EFF)(CAN 地址 17)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 28	ID. 27	ID. 26	ID. 25	ID. 24	ID. 23	ID. 22	ID. 21

注 ID. X 表示标识符位 X。

表 1.6-35 TX 标识符 2(SFF)(CAN 地址 18)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 20	ID. 19	ID. 18	ID. 17	ID. 16	ID. 15	ID. 14	ID. 13

注 ID. X 表示标识符位 X。

表 1.6-36 TX 标识符 3(EFF)(CAN 地址 19)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 12	ID. 11	ID. 10	ID. 9	ID. 8	ID. 7	ID. 6	ID. 5

注 ID. X 表示标识符位 X。

表 1.6-37 TX 标识符 4(EFF)(CAN 地址 20)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 4	ID. 3	ID. 2	ID. 1	ID. 0	X ^①	X ^②	X ^③

注 ID. X 表示标识符位 X。

① 不予关心的；如果使用自接收功能(自测试)，建议与接收缓冲器(RTR)兼容。

② 不予关心的；如果使用自接收功能(自测试)，建议与接收缓冲器(0)兼容。

表 1.6-38 帧格式(FF)和远程发送请求(RTR)位

位	值	功 能
FF	1	EFF；扩展帧格式将通过 CAN 控制器被发送
	0	SFF；标准帧格式将通过 CAN 控制器被发送
RTR	1	远程帧：远程帧将通过 CAN 控制器被发送
	0	数据帧：数据帧将通过 CAN 控制器被发送

(3) 数据长度码(DLC)。一个报文数据场中的字节数由数据长度码编码。在一个远程帧发送的开始，由于 RTR 位为逻辑 1(远程)，数据长度码是不被考虑的。这就迫使被发送/接收的数据字节数为逻辑 0。然而，如果两个 CAN 控制器同时开始一个具有相同标识符的远程帧发送，数据长度码必须被正确指定，以避免总线错误。数据字节计数范围为 0~8 个字节，并被编码为

$$\text{数据字节计数}=8\times\text{DLC. 3}+4\times\text{DLC. 2}+2\times\text{DLC. 1}+\text{DLC. 0}$$

为了兼容性，大于 8 的数据长度码不应被使用。如果选择一个大于 8 的值，在具有由 DLC 指定的数据长度码的数据帧中会有 8 个字节被发送。

(4) 标识符(ID)。在标准帧格式(SFF)中，标识符由 11 位(ID. 28~ID. 18)组成；在扩展帧格式(SFF)报文中，标识符由 29 位(ID. 28~ID. 0)组成。ID. 28 是最重要的位，在仲裁过程中它最先被发送到总线上。标识符作为报文的名称，它在接收器中用于接受过滤，也用于在仲裁过程中确定总线访问优先权。标识符的二进制数值越低，其优先权越高。这是由于在仲裁期间较大数目的前导显性位所致。

(5) 数据场。被传送的数据字节数由数据长度码决定。被发送的第一位是 CAN 地址 19(SFF)或 CAN 地址 21(EFF)中数据字节 1 的最高位。

2.5.4.14 接收缓冲器

接收缓冲器的整体配置和前一节中所描述的发送缓冲器很相似。接收缓冲器是 RXFIFO 中可访问的部分，并位于 CAN 地址 16~28 的区域。每个报文被再分为描述符和数

据场。

RXFIFO 中报文存储示例如图 1.6-25 所示。

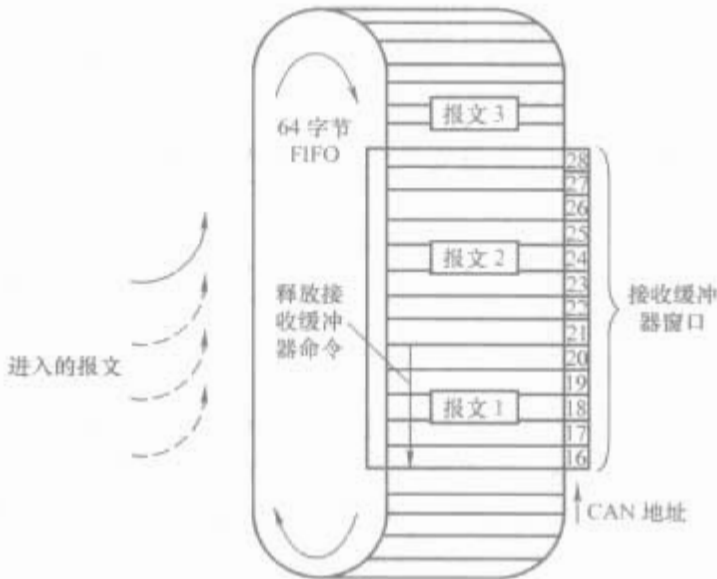


图 1.6-25 RXFIFO 中报文存储示例

接收缓冲器的位配置见表 1.6-39~表 1.6-41(SFF)和表 1.6-42~表 1.6-46(EFF)。所选配置与发送缓冲器配置兼容。

表 1.6-39 RX 帧信息(SFF)(CAN 地址 16)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
FF ^①	RTR ^②	0	0	DLC. 3 ^③	DLC. 2 ^③	DLC. 1 ^③	DLC. 0 ^③

① 帧格式。

② 远程发送请求。

③ 数据长度码位。

表 1.6-40 RX 标识符 1(SFF)(CAN 地址 17)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 28	ID. 27	ID. 26	ID. 25	ID. 24	ID. 23	ID. 22	ID. 21

注 ID. X 表示标识符位 X。

表 1.6-41 RX 标识符 2(SFF)(CAN 地址 18)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 20	ID. 19	ID. 18	RTR ^①	0	0	0	0

注 ID. X 表示标识符位 X。

① 远程发送请求。

表 1.6-42 RX 帧信息(EFF)(CAN 地址 16)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
FF ^①	RTR ^②	0	0	DLC. 3 ^③	DLC. 2 ^③	DLC. 1 ^③	DLC. 0 ^③

① 帧格式。

② 远程发送请求。

③ 数据长度码位。

表 1.6-43 RX 标识符 1(EFF)(CAN 地址 17)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 28	ID. 27	ID. 26	ID. 25	ID. 24	ID. 23	ID. 22	ID. 21

注 ID. X 表示标识符位 X。

表 1.6-44 RX 标识符 2(EFF)(CAN 地址 18)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 20	ID. 19	ID. 18	ID. 17	ID. 16	ID. 15	ID. 14	ID. 13

注 ID. X 表示标识符位 X。

表 1.6-45 RX 标识符 3(EFF)(CAN 地址 19)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 12	ID. 11	ID. 10	ID. 9	ID. 8	ID. 7	ID. 6	ID. 5

注 ID. X 表示标识符位 X。

表 1.6-46 RX 标识符 4(EFF)(CAN 地址 20)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
ID. 4	ID. 3	ID. 2	ID. 1	ID. 1	RTR ^①	0	0

注 ID. X 表示标识符位 X。

① 远程发送请求。

位于帧信息字节中的被接收的数据长度码代表实际被发送的数据长度码，发送数据长度码可能大于 8 字节(取决于发送器)。然而，被接收的数据字节最多为 8。从接收缓冲器中读一个报文时，此点应被重视。

如图 1.6-25 所示，RXFIFO 共有 64 字节的报文空间。在任何特定的时刻，FIFO 中可以存储的报文数取决于各个报文的长度。如果 RXFIFO 中没有足够的空间用于新报文，当此报文有效且通过接收测试时，CAN 控制器就会产生一

个数据溢出条件。数据溢出条件发生时，已部分写入 RXFIFO 的报文将被删除。这种情况可以通过状态寄存器和数据溢出中断指示给 CPU，如果使能。

2.5.4.15 接受过滤器

在接受过滤器的帮助下，仅当被接收报文的标识符位与接受过滤寄存器中预定义的那些位相等时，CAN 控制器才能允许被接收报文进入 RXFIFO。

接受过滤器通过接受码寄存器(ACRn)和接受屏蔽寄存器(AMRn)来定义。要接收的报文的位模式在接受码寄存器中被定义。对应的接受屏蔽寄存器允许定义某些位是“不予关心的”。

在模式寄存器(MOD. 3, AFM)中，有两种不同的过滤器模式可供选择：①单过滤器模式(AFM 位是逻辑 1)；②双过滤器模式(AFM 位是逻辑 0)。

(1) 单过滤器配置。接收标准帧和扩展帧报文的单过滤器配置分别如图 1.6-26 和图 1.6-27 所示。在此过滤器配置中，可以定义一个长过滤器(4 字节)。过滤器字节和报文字节之间位的对应关系取决于当前被接收的报文帧格式。

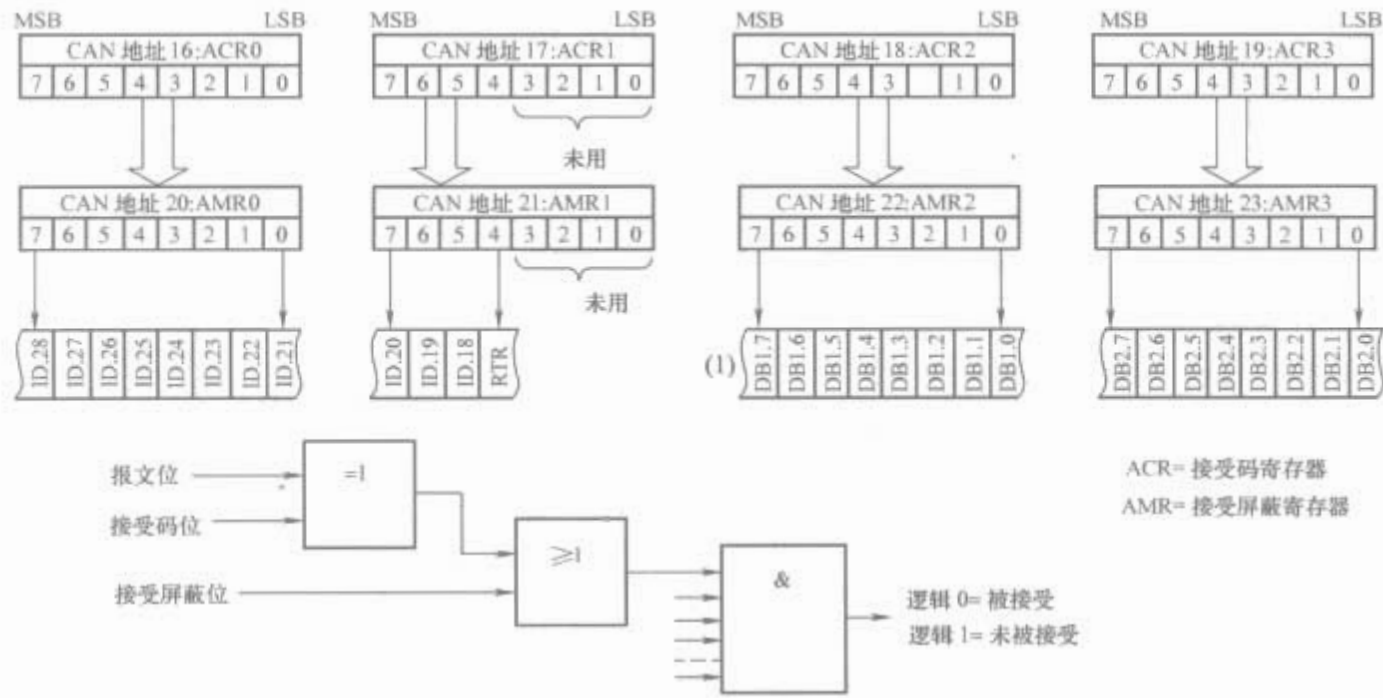


图 1.6-26 接收标准帧报文的单过滤器配置

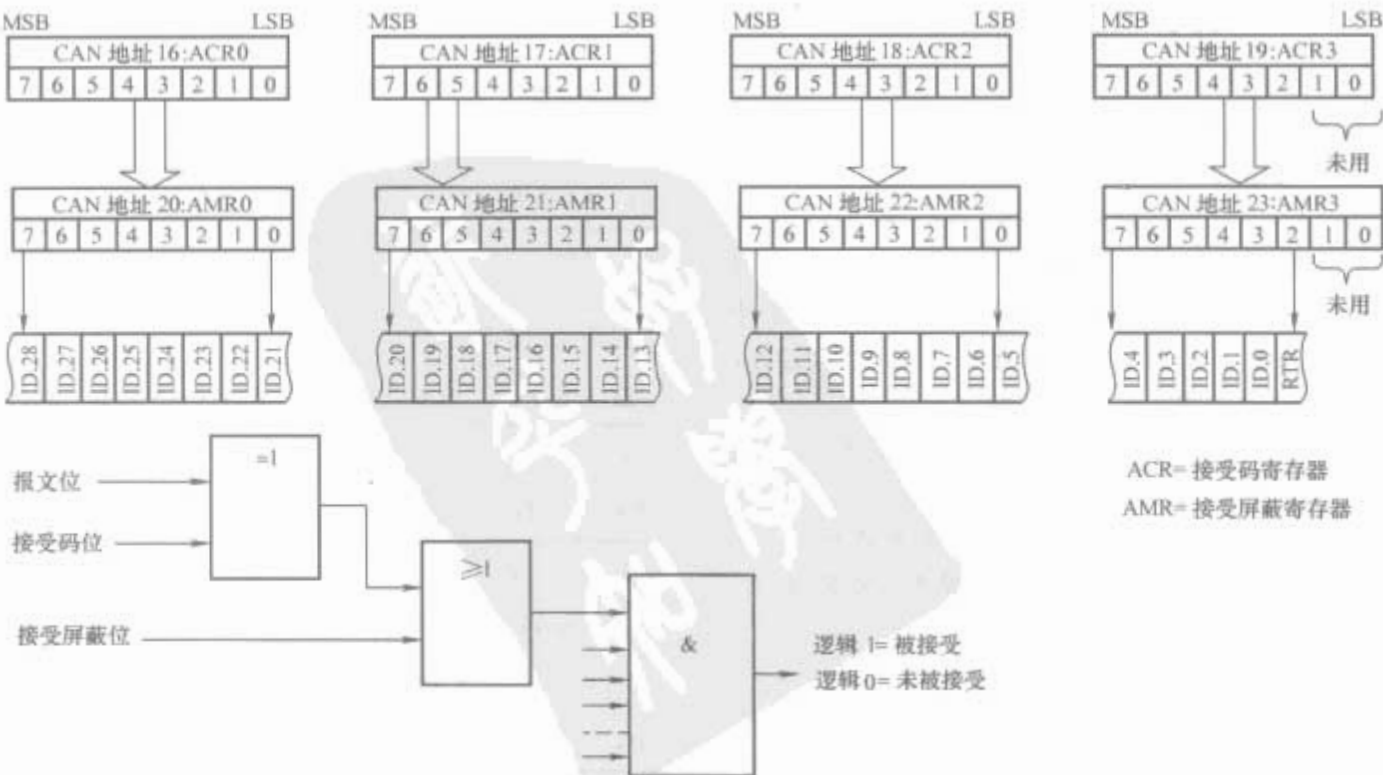


图 1.6-27 接收扩展帧报文的单过滤器配置

1) 标准帧：如果一个标准帧格式报文被接收，包括 RTR 位和前两个数据字节的标识符用于接受过滤器。如果由于置 RTR 位而导致没有数据字节存在，或由于对应的数据长度码没有或仅有一个数据字节，报文也可被接受。对于一个报文的成功接收，所有单个位的对比必须发信号接受。注意：AMR1 和 ACR1 的低 4 位是不用的。为了与将来的产品兼容，这些位可通过置位 AMR1.3、AMR1.2、AMR1.1 和 AMR1.0 为逻辑 1 而被编程为“不予关心的”。

2) 扩展帧：如果一个扩展帧格式报文被接收，包括 RTR 位的整个标识符用于接受过滤器。对于一个报文的成功接收，所有单个位的对比后，必须发信号接受。需要注意的是，AMR3 和 ACR3 最低 2 位是不被使用的。为了与将来的产品兼容，这些位可通过置位 AMR3.1 和 AMR3.0 为逻辑 1 而被编程为“不予关心的”。

(2) 双过滤器配置。在这种过滤器配置中，可以定义两个短过滤器配置。一个被接收的报文要与两个过滤器比较，来决定此报文是否应该被复制到接收缓冲器中。如果至少一个过滤器发出一个接受信号，被接收的报文才有效。过滤器字节和报文字节之间的位对应关系取决于当前被接收报文的帧格式。

1) 标准帧：如果一个标准帧报文被接收，这两个被定义的过滤器看起来是不同的。第一个过滤器比较包括 RTR 位的整个标准标识符和报文的第一个数据字节。第二个过滤器只比较包含 RTR 位的整个标准标识符。为了成功接收报

文，所有单个位比较时，至少有一个过滤器必须表示接收。如果置位 RTR 位或数据长度码为逻辑 0，则没有数据字节存在。然而，如果从开始到 RTR 位的比较结果都表示接受，则报文可以通过过滤器 1。如果不向过滤器 1 请求数据字节过滤，AMR1 和 AMR3 的低 4 位必须被置为逻辑 1（不予关心的）。那么使用包括 RTR 位的标准标识符范围的两个过滤器工作情况相同。

2) 扩展帧：如果一个扩展帧报文被接收，这两个被定义的过滤器看起来是相同的。两个过滤器仅比较扩展标识符的前两个字节。为了能成功接收一个报文，所有单个位比较结果至少有一个过滤器的必须表示接受。

接收标准帧和扩展帧报文的双过滤器配置分别如图 1.6-28 和图 1.6-29 所示。

2.5.4.16 RX 报文计数器(RMC)

RMC 寄存器(CAN 地址 29)呈现 RXFIFO 中的可用报文数。每接收一次，该值加 1；每次释放接收缓冲器命令，该值减 1；复位后，寄存器被清除。

RX 报文计数器各位的说明见表 1.6-47。

表 1.6-47 RX 报文计数器(RMC)各位的说明(CAN 地址 29)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
(0)①	(0)①	(0)①	RMC.4	RMC.3	RMC.2	RMC.1	RMC.0

① 此位不能被写。在读访问寄存器期间，结果总是 0。

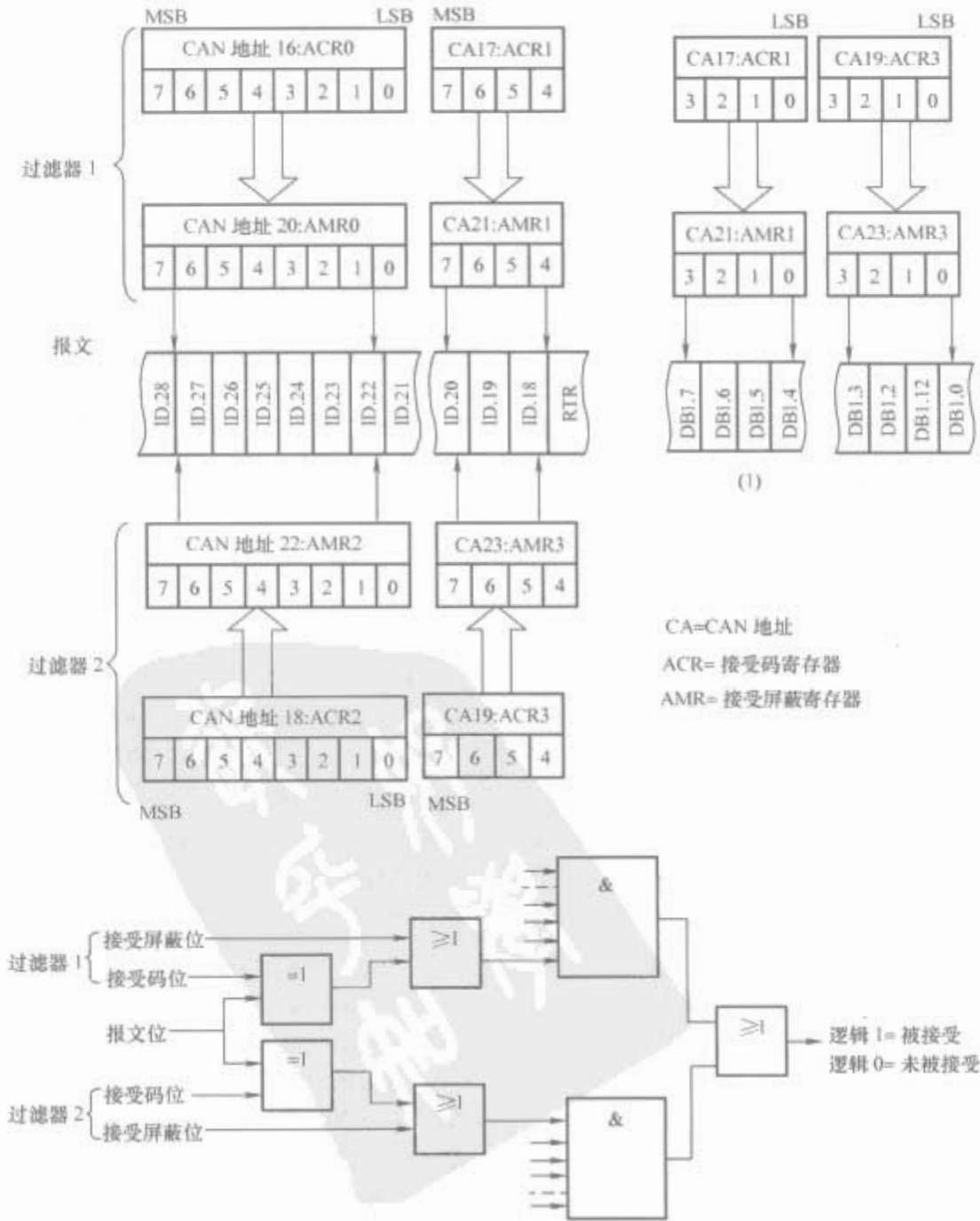


图 1.6-28 接收标准帧报文的双过滤器配置

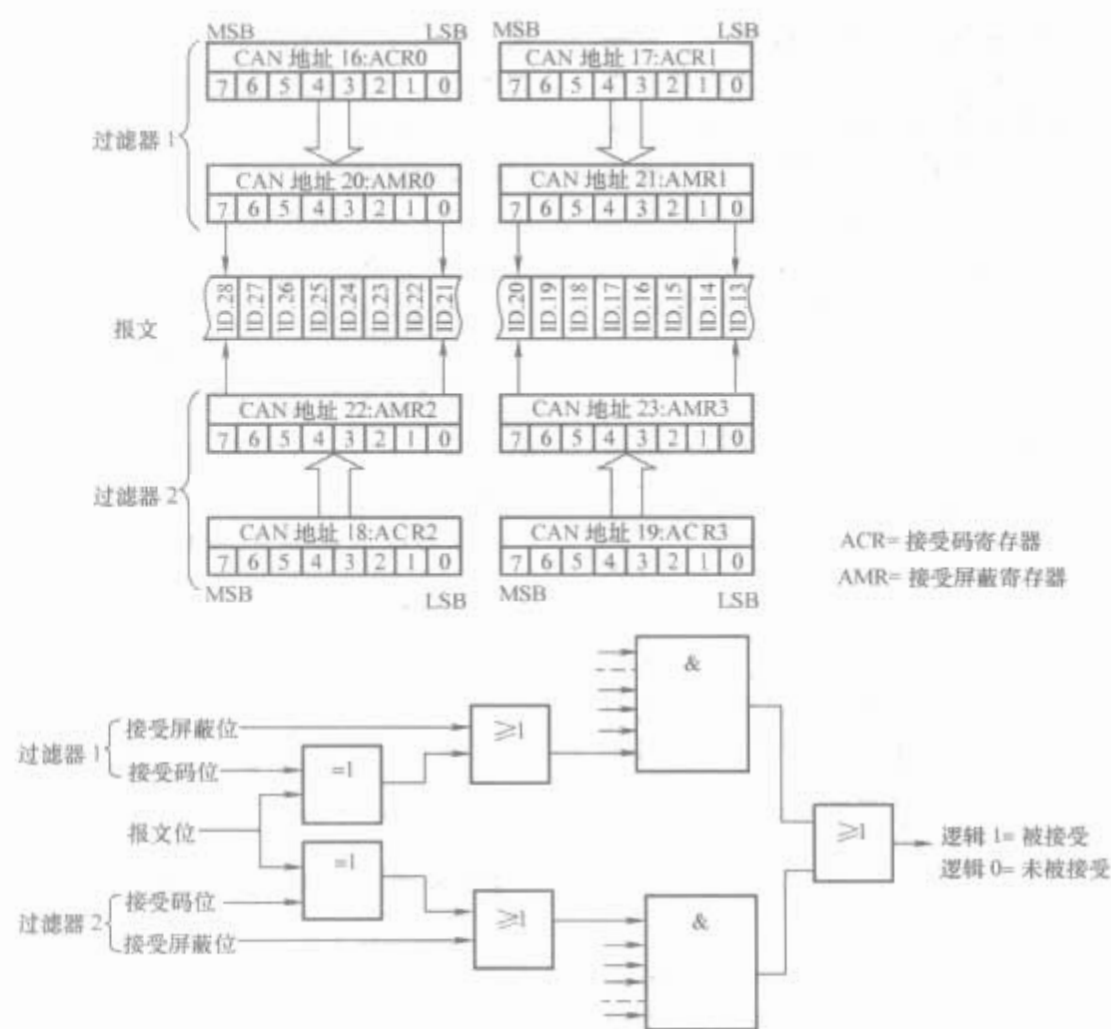


图 1.6-29 接收扩展帧报文的双过滤器配置

2.5.4.17 RX 缓冲器起始地址寄存器(RBSA)

RBSA 寄存器(CAN 地址 30)呈现被映像至接收缓冲器窗口中的被接收报文的第一个字节的当前有效的内部 RAM 地址。这些信息有助于说明内部 RAM 的内容。内部 RAM 地址区从 CAN 地址 32 开始,并可以被 CPU 进行读写访问(在复位模式下才可写)。

例如:如果 RBSA 被设置为 24(二进制),接收缓冲器窗口中的当前可视报文被存储在起始地址为 24 的内部 RAM 中。因为 RAM 也可被直接映像至从 CAN 地址 32(等于 RAM 地址 0)开始的 CAN 地址(CAN 地址=RBSA+32>24+32=56)空间。使用 CAN 地址 56 和随后的字节,此报文也可以被访问。

如果一个报文超过 RAM 地址 63,地址又从 RAM 地址 0 继续。

当 FIFO 中至少有一个可用报文时,就会执行释放接收缓冲器命令。RBSA 被修改到下一个报文的开头。

硬件复位时,指针被初始化为“00H”。软件复位(置复位模式位)时,指针保持原值,但是 FIFO 被清除,也就是说 RAM 内容不变,但是下一个被接收(或被发送)的报文将会改写接收缓冲器窗口中的当前可视报文。

对 CPU 来说,RX 缓冲器起始地址寄存器在运行模式中作为只读存储器;在复位模式下作为读/写存储器。需要注意的是:对 RBSA 的写访问在内部时钟频率的第一个上升沿后才首次有效。

RX 缓冲器起始地址寄存器各位的说明见表 1.6-48。

表 1.6-48 RX 缓冲器起始地址寄存器(RBSA) 各位的说明(CAN 地址 30)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
(0)①	(0)①	RBSA.5	RBSA.4	RBSA.3	RBSA.2	RBSA.1	RBSA.0

① 此位不能被写。在读访问寄存器期间,结果总是 0。

2.5.5 公共寄存器

2.5.5.1 总线定时寄存器 0(BTR0)

总线定时寄存器 0 的内容确定波特率预引比例因子(BRP)和同步跳转宽度(SJW)的值。若复位模式有效,此寄存器是可以被访问(读/写)的。

只有选择 PeliCAN 模式,此寄存器在运行模式中才是可读的。在 BasicCAN 模式中呈现的是 FFH。

总线定时寄存器 0 各位的说明见表 1.6-49。

表 1.6-49 总线定时寄存器 0(BTR0)各位的说明 (CAN 地址 6)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
SJW.1	SJW.0	BRP.5	BRP.4	BRP.3	BRP.2	BRP.1	BRP.0

(1) 波特率预引比例因子(BRP)。CAN 系统时钟 t_{sc1} 的周期是可编程的,并决定各个位定时。CAN 系统时钟使用下式进行计算

$$t_{sc1} = 2 \times t_{CLK} \times (32 \times BRP.5 + 16 \times BRP.4 + 8 \times BRP.3 + 4 \times BRP.2 + 2 \times BRP.1 + BRP.0 + 1)$$
$$t_{CLK} = XTAL \text{ 的频率周期} = 1/t_{XTAL}$$

(2) 同步跳转宽度(SJW)。为补偿在不同总线控制器的时钟振荡器之间的相移,任何总线控制器必须重同步于当前发送的任何相关信号沿。同步跳转宽度确定一个位时间可以被一次重同步所缩短或延长的时钟周期的最大数目

$$t_{SJW} = t_{sc1} \times (2 \times SJW.1 + SJW.0 + 1)$$

2.5.5.2 总线定时寄存器 1(BTR1)

总线定时寄存器 1 的内容确定位时间的长度、采样点的位置和在每个采样点欲获取的采样数目。如果复位模式有效,这个寄存器可以被访问(读/写)。只有选择 PeliCAN 模式,这个寄存器在运行模式中才是可读的。在 BasicCAN 模式中呈现的是 FFH。

总线定时寄存器 1 各位的说明见表 1.6-50。

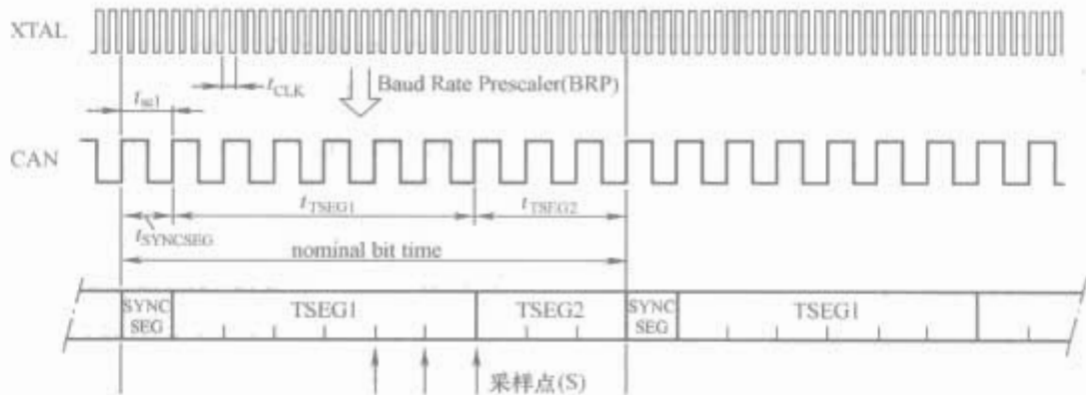
表 1.6-50 总线定时寄存器 1(BIR1)各位的说明(CAN 地址 7)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
SAM	TSEG2.2	TSEG2.1	TSEG2.0	TSEG1.3	TSEG1.2	TSEG1.1	TSEG1.0

(1) 采样(SAM)。SAM 位的取值说明见表 1.6-51。

表 1.6-51 采样(SAM)位的取值说明

位	值	功 能
SAM	1	3 倍：总线被采样 3 次；建议在低/中速总线(A 和 B 级)上使用，在这种总线上过滤总线上的尖峰是有益的
	0	单倍：总线被采样 1 次；建议用于高速总线上(SAEC 级)



可能值是 BRP=000001, TSEG1=0101, TSEG2=010
图 1.6-30 位周期的一般结构

输出控制寄存器各位的说明见表 1.6-52。

表 1.6-52 输出控制寄存器(OCR)各位的说明(CAN 地址 8)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
OCTP1	OCTN1	OCPOL1	OCTP0	OCTN0	OCPOL0	OCMODE1	OCMODE0

收发器的输入/输出控制逻辑如图 1.6-31 所示。

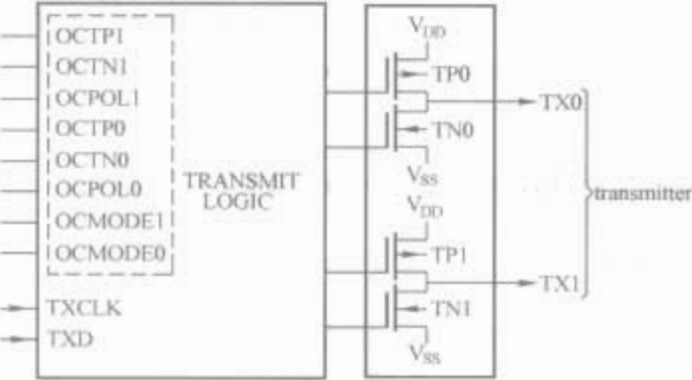


图 1.6-31 收发器的输入/输出控制逻辑

若 SJA1000 处于睡眠模式，相对于输出控制寄存器的内容，一个隐性电平在引脚 TX0 和 TX1 上输出。如果 SJA1000 处于复位状态(复位请求=高)或外部复位引脚RST被拉低时，输出 TX0 和 TX1 悬浮。

发送输出单元可以在不同模式中运行。OCMODE 各位的说明见表 1.6-53。

表 1.6-53 OCMODE 各位的说明

OCMODE1	OCMODE0	说 明
0	0	双相输出模式
0	1	测试输出模式①
1	0	正常输出模式
1	1	时钟输出模式

① 在测试输出模式中，TX_n 会在下一个系统时钟的上升沿反映在 RX 引脚上检验到的位。TN1、TN0、TP1 和 TP0 根据 OCR 的设置进行配置。

(2) 时间段 1(TSEG1)时间段 2(TSEG2)。位周期的一般结构如图 1.6-30 所示。(TSEG1)和(TSEG2)决定每一位时间的时钟数目和采样点的位置。

$$t_{\text{SYNCSEG}} = 1 \times t_{\text{scd}}$$
$$t_{\text{TSEG1}} = t_{\text{scd}} \times (8 \times \text{TSEG1.3} + 4 \times \text{TSEG1.2} + 2 \times \text{TSEG1.1} + \text{TSEG1.0} + 1)$$
$$t_{\text{TSEG2}} = t_{\text{scd}} \times (4 \times \text{TSEG2.2} + 2 \times \text{TSEG2.1} + \text{TSEG2.0} + 1)$$

2.5.5.3 输出控制寄存器(OCR)

输出控制寄存器允许在软件控制下建立输出驱动器的不同配置。如果复位模式有效，此寄存器可被访问(读/写)。只有选择 PeliCAN 模式，此寄存器在运行模式中才是可读的。在 BasicCAN 模式中呈现的是 FFH。

(1) 正常输出模式。在正常输出模式中，位序列(TXD)通过 TX0 和 TX1 被发送。输出驱动器引脚 TX0 和 TX1 的电平取决于由 OCTPx、OCTNx 编程的驱动器特性(悬浮、上拉、下拉、推挽)和由 OCPOLx 编程的输出极性这两个因素。

(2) 时钟输出模式。对于 TX0 引脚，这种模式与正常模式是相同的。但是，TX1 上的数据流被发送时钟(TXCLK)所代替。发送时钟的上升沿(非相反)标志一个位时间的开始。时钟脉冲宽度是 $1 \times t_{\text{scd}}$ 。

图 1.6-32 给出了时钟输出模式的一个例子。

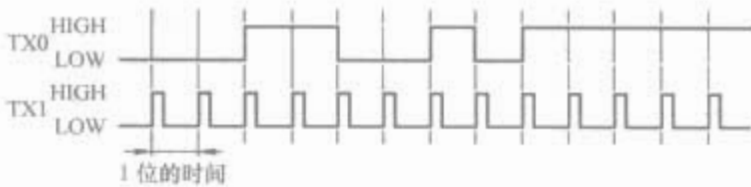


图 1.6-32 时钟输出模式举例

(3) 双相输出模式。与正常输出模式相比，这里的位表示是时间变量且是双态的。如果总线控制器被变压器与总线电隔离，位流不允许含有直流成分，这可通过下列方案来实现。在隐性位期间，所有输出是无效的(悬浮)；显性位以交替电平在 TX0 和 TX1 上发送，例如，第一个显性位在 TX0 上发送，第二个显性位在 TX1 上发送，而第三个显性位又在 TX0 上发送，如此等等。双相输出模式时序的一种可能配置见图 1.6-33。

(4) 测试输出模式。在测试输出模式中，连到 RX 上的电平在下一个系统时钟 $f_{\text{osc}/2}$ 的上升反映在 TX_n 上，TX_n 与输出控制寄存器中被编程的极性相对应。

表 1.6-54 给出了输出控制寄存器的位与输出引脚 TX0 和 TX1 之间的相互关系。

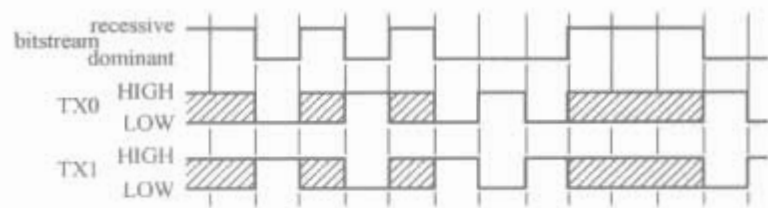


图 1.6-33 双相输出模式举例
(输出控制寄存器=F8H)

表 1.6-54 输出引脚配置

驱动	TXD	OCTPX	OCTNX	OCPOLX	TPX ^①	TNX ^②	TXX ^③
悬浮	×	0	0	×	关	关	悬浮
下拉	0	0	1	0	关	开	低
	1	0	1	0	关	关	悬浮
	0	0	1	1	关	关	悬浮
	1	0	1	1	关	开	低
上拉	0	1	0	0	关	关	悬浮
	1	1	0	0	开	关	高
	0	1	0	1	开	关	高
	1	1	0	1	关	关	悬浮
推挽	0	1	1	0	关	开	低
	1	1	1	0	开	关	高
	0	1	1	1	开	关	高
	1	1	1	1	关	开	低

注 表中×=不关心。
① TPX 是在片输出晶体管 X，接至 V_{DD}。
② TNX 是在片输出晶体管 X，接至 V_{SS}。
③ TXX 是引脚 TX0 或 TX1 上的串行输出电平。要求 CAN 总线上的输出电平，在 TXD=0 时为显性，在 TXD=1 时为隐性。

位序列 (TXD) 通过 TX0 和 TX1 被发送。输出驱动器引脚上的电平取决于被 OCTP、OCTN 编程的驱动器特性 (悬浮、上拉、下拉、推挽) 和被 OCPOL 编程的输出极性这两个因素。

2.5.5.4 时钟分频寄存器(CDR)

时钟分频寄存器控制用于微控制器的 CLKOUT 频率，也允许使 CLKOUT 引脚无效。另外，专用的接收中断脉冲在 TX1 上、接收比较器旁路、在 BasicCAN 模式与 PeliCAN 模式之间进行选择，在这里都是可以实现的。在硬件复位后，寄存器的默认状态对 Motorola 模式为 12 分频 (00000101)、对 Intel 模式为 2 分频 (00000000)。

软件复位(复位请求/复位模式)时，此寄存器不受影响。保留位(CDR.4)总呈现为逻辑 0。应用软件应总是向此位写 0，以便与将来的特性兼容(其中有些可能在使用此位时，是 1 激活的)。

时钟分频寄存器(CDR)各位的说明见表 1.6-55。

表 1.6-55 时钟分频寄存器(CDR)各位的说明
(CAN 地址 31)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
CAN 模式	CBP	RXINTEN	(0) ^①	时钟关闭	CD.2	CD.1	CD.0

① 此位不能被写。在此寄存器读出期间，总给出一个 0。

(1) CD.2~CD.0。在复位模式中也像在运行模式中一样，CD.2~CD.0 位是可以无限制地访问的。这些位用来确定外部 CLKOUT 引脚上的频率。CLKOUT 频率选择见表 1.6-56。

表 1.6-56 CLKOUT 频率选择

CD.2	CD.1	CD.0	时钟频率
0	0	0	$f_{osc}/2$
0	0	1	$f_{osc}/4$
0	1	0	$f_{osc}/6$
0	1	1	$f_{osc}/8$
1	0	0	$f_{osc}/10$
1	0	1	$f_{osc}/12$
1	1	0	$f_{osc}/14$
1	1	1	f_{osc}

注 f_{osc} 是外部振荡器 (XTAL) 频率。

(2) 时钟关闭。置位此位可使 SJA1000 的外部 CLKOUT 引脚成为无用的。只有在复位模式中才可以写访问。如果此位被置位，CLKOUT 引脚在睡眠模式中是低，而在其他情况下是高。

(3) RXINTEN。此位允许 TX1 输出用作专用的接收中断输出。当一个被接收的报文已成功通过接受过滤器，具有一位时间长度的接收中断脉冲总是在 TX1 引脚输出 (在帧结束的最后一位期间)。发送输出单元应该工作在正常输出模式。极性和输出驱动通过输出控制寄存器编程。写访问只在复位模式中是可能的。

(4) CBP。置位 CDR.6 可以绕过 CAN 输入比较器，但置位 CDR.6 只在复位模式中是可能的。这用于 SJA1000 接至一个外部收发器电路时。此时内部延时被减少，这将导致最大可能总线长度的增加。如果 CBP 被置位，只有 RX0 是激活的。没有被使用的 RX1 输入应被连接到一个确定的电平 (例如，V_{ss})。

(5) CAN 模式。CDR.7 确定 CAN 模式。如果 CDR.7 是逻辑 0，CAN 控制器工作于 BasicCAN 模式。如果设置为逻辑 1，CAN 控制器工作于 PeliCAN 模式。写访问只在复位模式中是可能的。

3 CAN 控制器接口——PCA82C250

3.1 特性

- (1) 与“ISO 11898”标准完全兼容。
- (2) 高速率 (可达 1Mbit/s)。
- (3) 具有抗汽车环境下瞬间干扰，保护总线能力。
- (4) 采用斜率控制，以降低射频干扰 (RFI)。
- (5) 为了对电磁干扰具有高免疫力，采用具有宽公共模式范围的差动接收器。
- (6) 热保护。
- (7) 电源和地之间的短路保护。
- (8) 低电流待机模式。
- (9) 未上电节点不影响总线。
- (10) 总线至少可连接 110 个节点。

3.2 一般说明

PCA82C250 是 CAN 控制器和物理总线之间的接口。器件提供向总线的差动发送能力和对 CAN 控制器的差动接收能力。

PCA82C250 封装形式主要有两种：一种为 8 引脚的塑质双列式封装 (DIP8)，另一种为 8 引脚的塑质小型线外封

装(S08)。其主要数据如表 1.6-57 所示。

表 1.6-57 PCA82C250 基本数据				
符号	参 数	条 件	最小值	最大值
V_{CC}	电源电压(V)		4.5	5.5
I_{CC}	电源电流(μA)	待机模式	—	170
1/tbit	发送速率最大值(Mbit/s)	不归零	1	—
V_{CAN}	CANH、CANL 输入/输出电压(V)		-8	+18
V_{diff}	总线差动电压(V)		1.5	3.0
t_{PD}	传播延时(ns)	高速模式	—	50
T_{amb}	工作环境温度($^{\circ}C$)		-40	+125

3.3 框图

PCA82C250 框图如图 1.6-34 所示。

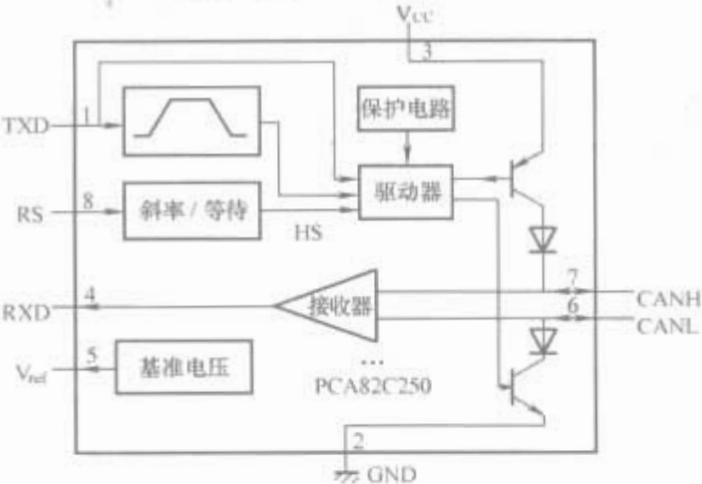


图 1.6-34 PCA82C250 框图

3.4 引脚排列

PCA82C250 引脚排列与配置分别如表 1.6-58 和图 1.6-35所示。

表 1.6-58 引脚排列		
符号	引脚	说 明
TXD	1	发送数据输入端
GND	2	地
V_{CC}	3	电源电压
RXD	4	接收数据输出端
V_{ref}	5	基准电压输出端
CANL	6	低电平 CAN 电压输入/输出端
CANH	7	高电平 CAN 电压输入/输出端
RS	8	斜率电阻输入端

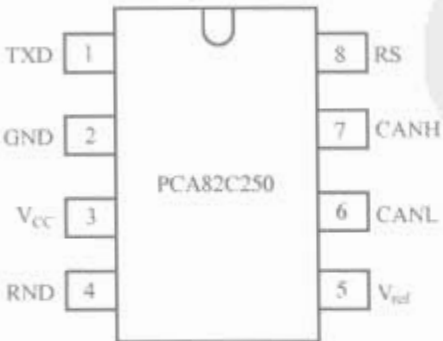


图 1.6-35 引脚配置

3.5 功能说明

PCA82C250 是 CAN 控制器和物理总线之间的接口。它最初是为汽车中的高速应用(可达 1Mbit/s)而设计的。器件提供向总线的差动发送能力和对 CAN 控制器的差动接收能

力,它与“ISO 11898”标准完全兼容。

一个限流电路可防止发送器输出级对电源电压正、负极短路。虽然短路出现时,功耗增加,但这种特性可以防止发送器输出级损坏。

若结温超过大约 160 $^{\circ}C$,则两个发送器输出端的极限电流将降低。由于发送器是功耗的主要部分,这将导致功耗的降低且限制了芯片的温升。IC 的所有其他部分将继续工作。当总线短路时,热保护特别重要。

CANH 线和 CANL 线有助于抑制汽车在恶劣环境下的电气瞬变现象。引脚 8(RS)用于选择三种不同的工作模式:高速、斜率控制或待机。

对于高速运行模式,发送器输出端晶体管被简单地尽可能快地启闭。在这种模式下,不采取任何措施限制上升和下降速率。建议使用屏蔽电缆以避免 RFI 问题。通过引脚 8 接地可选择高速模式。

对于较低速度或较短的总线长度,可选用非屏蔽双绞线或平行线做总线。为降低 RFI 应限制上升和下降斜率。上升和下降斜率可由连接引脚 8 和地的电阻进行控制。斜率正比于引脚 8 上的电流输出。

如果引脚 8 加上高电平,电路进入低电流待机模式。在这种模式下,发送器被关闭,接收器转为低电流。若检测到显性位(总线差分电压>0.9V),RXD 将转为低电平。微控制器通过将收发器变为正常运行状态(通过引脚 8)对此条件做出反应。由于在待机模式下,接收器慢,所以将丢失第一个报文。

CAN 收发器真值表见表 1.6-59;引脚 RS 的 3 种模式见表 1.6-60。

表 1.6-59 CAN 收发器真值表					
电 源	TXD	CANH	CANL	总线状态	RXD
4.5~5.5V	0	高	低	显性	0
4.5~5.5V	1(或悬浮)	悬浮	悬浮	隐性	1
<2V(未上电)	X(1)	悬浮	悬浮	隐性	X(1)
$2V < V_{CC} < 4.5V$	$> 0.75V_{CC}$	悬浮	悬浮	隐性	X(1)
$2V < V_{CC} < 4.5V$	X(1)	若 $V_{Rs} > 0.75V_{CC}$, 则悬浮	若 $V_{Rs} > 0.75V_{CC}$, 则悬浮	隐性	X(1)

注 X=任意值。

表 1.6-60 引脚 RS 的 3 种模式		
引脚 RS 上强制条件	模 式	引脚 RS 上的结果电压或电流
$V_{RS} > 0.75V_{CC}$	待机	$I_{RS} < 10\mu A $
$-200\mu A < I_{RS} < -10\mu A$	斜率控制	$0.4V_{CC} < V_{Rs} < 0.6V_{CC}$
$V_{RS} < 0.3V_{CC}$	高速	$I_{RS} < -500\mu A$

3.6 极限值

PCA82C250 的极限值见表 1.6-61。其中极限值符合绝对最大额定值系统(IEC 60134);所有电压都以引脚 2 为基准;正输入电流。

表 1.6-61 PCA82C250 的极限值				
符号	参 数	条 件	最小值	最大值
V_{CC}	电源电压(V)		-0.3	+9.0
V_a	引脚 1、4、5、8 上的 DC 电压(V)		-0.3	$V_{CC} + 0.3$
$V_{6,7}$	引脚 6、7 上的 DC 电压(V)	$0V < V_{CC} < 5.5V$; 无时间限制	-8.0	+18.0

续表

符号	参 数	条 件	最小值	最大值
V_{tr}	引脚 6、7 上的跳变电压(V)		-150	+100
T_{stg}	储存温度(℃)		-55	+150
T_{amb}	工作环境温度(℃)		-40	+125
T_{vj}	实际结温(℃)	①	-40	+150
V_{est}	静电放电电压(V)	②	-2000	+2000
		③	-200	+200

- ① 根据 IEC 60747—1，实际结温的另外一个定义为：
 $T_{vj}=T_{amb}+P_d\times R_{th(vj-a)}$ ， $R_{th(vj-a)}$ 是为计算 T_{vj} 使用的固定值。
 T_{vj} 的额定值限定功耗(P_d)和工作环境温度(T_{amb})的允许的组合。
- ② 类别 A：人体模型； $C=100PF$ ； $R=1500\Omega$ ； $V=\pm 2000V$ 。
- ③ 类别 B：机器模型； $C=200PF$ ； $R=25\Omega$ ； $V=\pm 200V$ 。

表 1.6-63

PCA82C250 的特性

符 号	参 数	条 件	最小值	典型值	最大值
电 源					
I_3	电源电流 (mA)	显性： $V_1=1V$	—	—	70
		隐性： $V_1=4V$ ； $R_8=47k\Omega$	—	—	14
		隐性： $V_1=4V$ ； $V_8=1V$	—	—	18
		待机： $T_{amb}<90^{\circ}C$ ①	—	100	170
DC 总线发送器					
V_{IH}	高电平输入电压(V)	输出隐性	$0.7V_{CC}$	—	$V_{CC}+0.3$
V_{IL}	低电平输入电压(V)	输出显性	-0.3	—	$0.3V_{CC}$
I_{IH}	高电平输入电流(μA)	$V_1=4V$	-200	—	+30
I_{IL}	低电平输入电流(μA)	$V_1=1V$	-100	—	-600
$V_{6,7}$	隐性总线电压(V)	$V_1=4V$ ；无负载	2.0	—	3.0
I_{LO}	关闭状态输出漏电流(mA)	$-2V<(V_6, V_7)<7V$	-2	—	+1
		$-5V<(V_6, V_7)<18V$	-5	—	+12
V_7	CANH 输出电压(V)	$V_1=1V$	2.75	—	4.5
V_6	CANL 输出电压(V)	$V_1=1V$	0.5	—	2.25
$\Delta V_{6,7}$	引脚 6 和 7 之间的输出电压之差	$V_1=1V$	1.5	—	3.0
		$V_1=1V$ ； $R_L=45\Omega$ ； $V_{CC}\geq 4.9V$	1.5	—	—
		$V_1=4V$ ；无负载	-500mV	—	+50mV
I_{SC7} (mA)	CANH 短路电流	$V_7=-5V$ ； $V_{CC}\leq 5V$	—	—	-105
		$V_7=-5V$ ； $V_{CC}=5.5V$	—	—	-120
I_{SC6} (mA)	CANL 短路电流	$V_8=18V$	—	—	160
DC 总线接收器： $V_1=4V$ ；引脚 6 和 7 由外部驱动； $-2V<(V_6, V_7)<7V$ ；除非另有说明					
$V_{diff(r)}$ (V)	差动输入电压(隐性)		-1.0	—	+0.5
		$-7V<(V_6, V_7)<12V$ 非待机模式	-1.0	—	+0.4
$V_{diff(d)}$ (V)	差动输入电压(显性)		0.9	—	5.0
		$-7V<(V_6, V_7)<12V$ 非待机模式	1.0	—	5.0
$V_{diff(hys)}$ (mV)	差动输入滞后电压		—	150	—
V_{OH} (V)	高电平输出电压(引脚 4)	$I_4=-100\mu A$	$0.8V_{CC}$	—	V_{CC}

3.7 热特性

PCA82C250 的热特性如表 1.6-62 所示。

表 1.6-62 PCA82C250 的热特性

符号	参 数	条 件	值
$R_{th(j-a)}$ (K/W)	从焊点到周围环境的热阻 PCA82C250 PCA82C250T	在大气中	100 160

3.8 特性

PCA82C250 的特性如表 1.6-63 所示。其中 $V_{CC}=4.5\sim 5.5V$ ， $T_{amb}=(-40\sim +125)^{\circ}C$ ， $R_L=60\Omega$ ； $I_8>-10\mu A$ 。除非另外说明，所有电压均以地(引脚 2)为参考，正输入电流；所有参数在所设计的周围环境温度范围内均可确保，但 100%测试仅在 1125℃进行。

续表					
符 号	参 数	条 件	最小值	典型值	最大值
V_{OL} (V)	低电平输出电压 (引脚 4)	$I_A=1\text{mA}$	0	—	$0.2V_{CC}$
		$I_A=10\text{mA}$	0	—	1.5
R_i (k Ω)	CANH、CANL 输入电阻		5	—	25
R_{diff} (k Ω)	差动输入电阻		20	—	100
C_i (pF)	CANH、CANL 输入电容		—	—	20
C_{diff} (pF)	差动输入电容		—	—	10
基 准 输 出					
V_{ref} (V)	基准输出电压	$V_8=1\text{V}; -50\mu\text{A}<I_5<50\mu\text{A}$	$0.45V_{CC}$	—	$0.55V_{CC}$
		$V_8=4\text{V}; -5\mu\text{A}<I_5<5\mu\text{A}$	$0.4V_{CC}$	—	$0.6V_{CC}$
定 时					
t_{bit} (μs)	最小位时间	$V_8=1\text{V}$	—	—	1
t_{onTXD} (ns)	延迟 TXD 至总线激活	$V_8=1\text{V}$	—	—	50
t_{offTXD} (ns)	延迟 TXD 至总线非激活	$V_8=1\text{V}$	—	40	80
t_{onRXD} (ns)	延迟 TXD 至接收器激活	$V_8=1\text{V}$	—	55	120
t_{offRXD} (ns)	延迟 TXD 至接收器非激活	$V_8=1\text{V}; V_{CC}<5.1\text{V}; T_{amb}<+85^\circ\text{C}$	—	82	150
		$V_8=1\text{V}; V_{CC}<5.1\text{V}; T_{amb}<+125^\circ\text{C}$	—	82	170
		$V_8=1\text{V}; V_{CC}<5.5\text{V}; T_{amb}<+85^\circ\text{C}$	—	90	170
		$V_8=1\text{V}; V_{CC}<5.5\text{V}; T_{amb}<+125^\circ\text{C}$	—	90	190
t_{onTXD} (ns)	延迟 TXD 至接收器激活	$R_8=47\text{k}\Omega$	—	390	520
		$R_8=24\text{k}\Omega$	—	260	320
t_{offTXD} (ns)	延迟 TXD 至接收器非激活	$R_8=47\text{k}\Omega$	—	260	450
		$R_8=24\text{k}\Omega$	—	210	320
$ SR $ (V/ μs)	差动输出电压回转率	$R_8=47\text{k}\Omega$	—	14	—
t_{WAKE} (μs)	从待机的唤醒时间(通过引脚 8)开始		—	—	20
t_{dRXDL} (μs)	总线显性至 RXD 为低	$V_8=4\text{V}$; 待机模式	—	—	3
待机/斜率控制(引脚 8)					
V_8 (V)	高速输入电压		—	—	$0.3V_{CC}$
I_8 (μA)	高速输入电流	$V_8=0\text{V}$	—	—	-500
V_{enb} (V)	待机模式输入电压		$0.75V_{CC}$	—	—
I_{slope} (μA)	斜率控制模式电流		-10	—	-200
V_{slope} (V)	斜率控制模式电压		$0.4V_{CC}$	—	$0.6V_{CC}$

注 $I_1=I_4=I_5=0\text{mA}$; $0\text{V}<V_6<V_{CC}$; $0\text{V}<V_7<V_{CC}$; $V_8=V_{CC}$ 。

4 其他 CAN 控制器与控制器接口

4.1 CAN 总线发送/接收驱动器

总线发送/接收驱动器(Transceiver)实现总线控制器与总线

之间的接口功能，完成信号形式的转换和总线驱动功能。设计 CAN 节点时，实现总线发送/接收驱动功能有两种形式，一个是选用带有总线驱动功能的总线控制器；另一个是使用独立的总线发送/接收驱动器。表 1.6-64 是 Bosch 的 CF150C 系列 CAN 总线发送/接收驱动器产品，其中 CF150C 是最基础的器件。

表 1.6-64 BOSCHCAN 总线发送/接收器

性 能	型 号				
	CF105C	CF151	CF160	CF161	CF173/CF175
满足 ISO11898	是	是	是	是	是
保护功能	短路保护	短路保护	过热保护	过热保护	短路保护
供电电压(V)	5	5	5	微控制器 3; 总线 5	微控制器 3; 总线 5

续表

性 能	型 号				
	CF105C	CF151	CF160	CF161	CF173/CF175
环境温度(℃)	-40~110	-40~125	-40~125	-40~125	-40~125
封 装	SOIC8	SOIC8	SOIC8	SOIC8	SOIC8
兼 容		完全兼容 CF150C	引脚 1~4, 6, 7 与 CF150C 兼容	引脚 1~4, 6, 7 与 CF150C 兼容	2002 年 9 月推出产品
其他功能	有高/低速模式	有高/低速模式	有复位功能, 改进的 EMC 性能, 只有高速模式, 无外部线圈	无复位功能, 改进的 EMC 性能, 只有高速模式, 无外部线圈	只有高速模式支持 42V 电源, 有唤醒功能、有杰出的 EMC 性能

CF150C 是双向 CAN 发送/接收器, 它支持最高 500kbit/s 的传输速度。CF150C 的基本特性如下:

- (1) 与 ISO/DIS11898 标准兼容。
- (2) 差动输出。
- (3) 发送电路具有 (-5~36) V 的短路保护, 有自动检测和关断功能。
- (4) 具有降低射频和电磁干扰的能力。
- (5) 有 500kbit/s 和 250kbit/s 两种可调节的信号跳变沿斜率控制 (Slope Control)。
- (6) 具有高抗干扰的差动输入能力。
- (7) 共模输入电压范围: (-5~12) V。

CF150C 为 SOIC8 封装, 引脚见表 1.6-65。CF150C 的原理结构如图 1.6-36 所示。

表 1.6-65 CF150C 引脚功能

引脚序号	引脚名称	功 能
1	TX0	发送输入
2	B	地
3	A	供电电压
4	RX0	接收输出
5	RXI	参考电压
6	C-L	总线输出低
7	C-H	总线输出高
8	ASC	斜率控制

CF150C 是 CAN 控制器和总线之间的接口电路, 其功能见表 1.6-66。引脚 C-L 和 C-H 具有短路保护功能; 当出现引脚 C-H 与 C-L 或引脚 C-L 与 B 端的短路时, 自动禁止输出以保护芯片不被损坏。如果 C-L 的电位 V_{C-L} 大于最高允许值 V_{C-Lmax} 输出也将被立即禁止。引脚 ASC 用于选择高速 (500kbit/s) 和低速 (250kbit/s) 两种工作模式。总线在高速模式时 ASC 与 V_B 连接; 在低速时 ASC 与 V_A 连接。总线上信号的变化沿的斜率被降低, 以减小电磁干扰。

表 1.6-66 CF150C 的功能表

总线状态	引脚状态			
	TX0	RX0	C-H	C-L
显性	L	L	H	L
隐性	悬浮	H	悬浮	悬浮

其他一些主流 CAN 总线发送接收驱动器如表 1.6-67 所示。

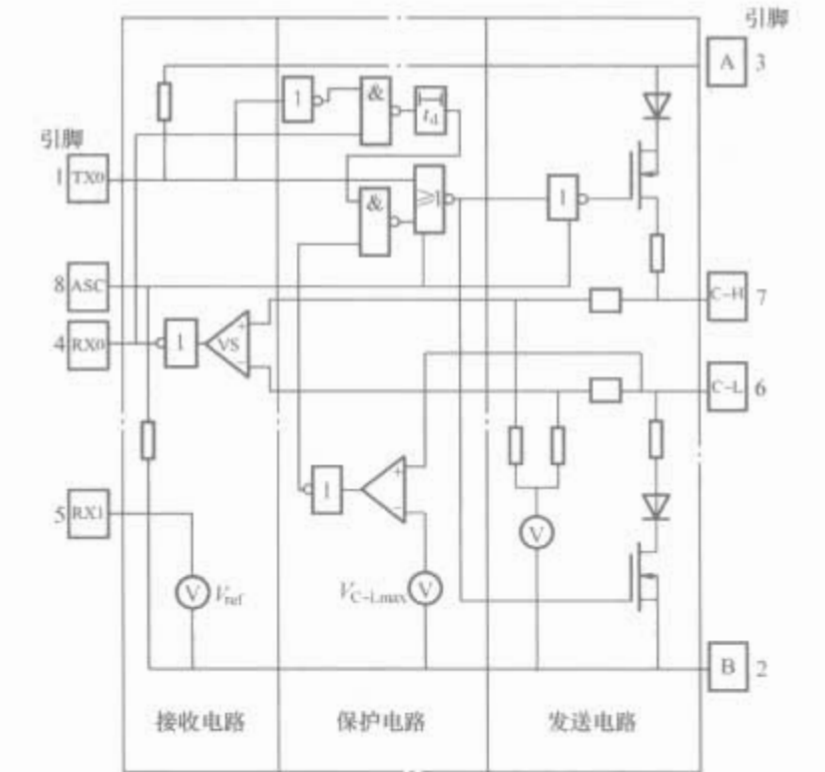


图 1.6-36 CF150C 原理结构图

表 1.6-67 CAN 总线发送接收驱动器

生产商	系 列	性 能
Philips	AU5790D	单线 CAN 发送/接收器, 用于车上网络的 CAN 控制器与单线总线的接口; 高速传输模式 83kbit/s, 低射频干扰 (RFI), 汽车环境下的短路保护功能, 地悬浮保护功能, 过热保护功能, 支持网络低功耗状态下的通信功能
Philips	PCA82C250	主要用于车上高速 CAN 网络的控制器与总线间的接口, 与 ISO11898 兼容; 传输速率 1Mbit/s, 具有抗汽车环境下瞬态干扰和总线保护能力; 具有降低射频干扰 (RFI) 的信号变化率调节功能, 过热保护功能; 低电流待机模式, 断电时不影响总线状态, 可连接 110 个节点
Philips	PCA82C251	主要用于货车和客车上的 CAN 控制器与总线间的接口, 差动发送/接收信号, 1Mbit/s 传输速率, 适应 24V 系统并与 ISO11898 完全兼容; 具有降低射频干扰 (RFI) 的信号变化率调节功能; 过热保护功能; 对 24V 的地及电源短路保护功能; 低电流待机模式, 断电时不影响总线状态; 可连接 110 个节点; 高的抗电磁干扰能力

续表		
生产商	系 列	性 能
Philips	PCA82C252	具有容错功能的 CAN 发送/接收器，主要用于乘用车上低速 CAN 网络中控制器与总线间的接口；差动发送信号，当有故障时自动转入单线发送或接收方式，故障消除后自动恢复差动传输；125kbit/s 传输速率；具有降低射频干扰（RFI）的信号变化率调节功能，总线故障管理功能，过热保护功能，对 12V 的地及电源短路保护功能，低电流待机模式，断电时不影响总线状态，可连接 15 个节点，可以使用非屏蔽电缆，支持低功耗模式和休眠及唤醒工作模式，高的抗电磁干扰能力
Philips	TJA1050	高速 CAN 发送/接收器 PCA82C250 的换代产品，与 ISO 11898 完全兼容；1Mbit/s 传输速率，极低的电磁发射（EME），具有高抵抗共模干扰的差动接收电路，断电时影响总线状态；具有发送禁止工作方式和发送显性位超时检测功能，针对汽车环境的总线插件保护，输入兼容 3.3V 设备，过热保护功能，对地及电源短路保护功能；可连接 110 个节点
Philips	TJA1053	具有容错功能的 CAN 发送/接收器，是基于 PCA82C252 的改进产品。主要用于乘用车上的低速 CAN 网络中控制器与总线间的接口；可连接 32 个节点，可以使用非屏蔽电缆，发送显性位超时检测功能；差动发送信号，当有故障时自动转入单线发送或接收方式，故障消除后自动恢复差动传输；125kbit/s 传输速度；具有降低射频干扰（RFI）的信号变化率调节功能；总线故障管理功能，过热保护功能，对 12V 的地及电源短路保护功能，低电流待机模式，断电时不影响总线状态；支持低功耗模式和休眠及唤醒工作模式；高的抗电磁干扰能力；针对汽车环境的总线保护
Philips	TJA105	具有容错功能的 CAN 发送/接收器，与 PCA82C252 和 TJA1053T 引脚兼容，这两种芯片可以直接由 TJA1054T 取代。主要的改进：①CANL 和 CANH 匹配优化减小了射频干扰（RFI）；②改进了电磁兼容性能，尤其在低功耗模式；③在故障模式时的唤醒能力；④扩展了故障管理能力
Infineon	TLE6272	传输速率 1Mbit/s，极高的 EMC 性能，极低静态电流的电压调节器；具有上电和带电复位，输出对地和电源的短路保护，反极性保护、过热保护、过载和短路保护
Infineon	TLE6250	传输速率 1Mbit/s，适应汽车环境的极高的 EMC 性能和 ESD 保护
Infineon	TLE6252	传输速率 125kbit/s，极高的 EMC 性能，极低静态电流的电压调节器；具有上电和带电复位，对 12V 供电系统地和电源的短路保护，反极性保护，过热保护，过载和短路保护；待机和休眠状态电流消耗低，优化的 EMI 特性差动发送信号，当有故障时自动转入单线发送或接收方式，故障消除后自动恢复差动传输；适应汽车环境总线保护

续表		
生产商	系 列	性 能
Infineon	TLE6254	传输速率 125kbit/s，待机和休眠状态电流消耗低，支持已接收工作模式，优化的 EMC 性能，唤醒信号双向有效，电源故障报警，扩展的故障管理功能和容错功能，极低静态电流的电压调节器；具有上电和带电复位，对 12V 供电系统地和电源的短路保护，反极性保护，过热保护，过载和短路保护，优化的 EMI；特性差动发送信号，当有故障时自动转入单线发送或接收方式，故障消除后自动恢复差动传输；适应汽车环境总线保护
Infineon	TLE6255	为 GM 公司开发的汽车单线 CAN 总线发送/接收器。传输速率 33kbit/s，极高的 EMC 性能，高速模式 100kbit/s，电源电压 5.5～28V，休眠状态电流 30μA，4kV ESD 保护，过热保护，过载和短路保护，唤醒信号双向有效，地悬浮保护，输出显性位定时功能

4.2 独立 CAN 控制器

目前，有适应各种不同需求或性能的 CAN 控制器芯片，包括独立的和嵌入微控制器的 CAN 控制器，各公司的产品或不同型号的产品参数有所不同，结构也可能有一些区别，但基本原理和基本功能是一样的。表 1.6-68 是一些常用的独立 CAN 控制器产品。

表 1.6-68 一些常用的独立 CAN 控制器

生产商	系 列	性 能
Philips	SJA1000	支持 11 位、29 位标识符，速率 1Mbit/s，24Mbit/s 时钟，多种 CPU 接口模式，使用环境温度（-40～125）℃，支持 CANB2.0，与 PCX82C200 兼容
Bosch	CC750	支持 CAN2.0 PartA、B，可编程的传输速率，15 个 8 字节信息目标模块[14 个发送/接收（TX/RX）缓冲器，1 个 RX 缓冲器]，对标准的和扩展的标识符可编程的全局屏蔽，串行 CPU 接口（与 Intel82527 串行接口方式兼容），SOIC16-W 封装
Bosch	CC770	支持 CAN2.0 PartA、B（包括扩展帧格式），可编程的传输速率，15 个 8 字节信息目标模块[14 个发送/接收（TX/RX）缓冲器，1 个 RX 缓冲器]，对标准的和扩展的标识符可编程的全局屏蔽，两个 8 位并行 I/O 接口，支持并行的 8 位和 16 位 Intel 或 Motorola 微控制器接口、同步串行接口，与 Intel82527 功能和引脚兼容，PLCC44 封装
Bosch	TTCAN	支持 CAN2.0 PartA、B 和 TTCAN（ISO 11898-4）；传输速率 1Mbit/s，可编程的传输速率，32 个信息目标模块，可编程的信息目标 FIFO，支持事件同步时间触发通信方式，每个信息目标屏蔽码可编程，支持并行的 8 位和 16 位微控制器接口和同步串行接口，PLCC44 封装

续表		
生产商	系 列	性 能
Infineon	SAE81C90/91	支持 CAN2.0 PartA (partB passive), 传输速率可达 1Mbit/s, 16 个信息目标模块, 标识符可编程, 具有并行和串行两种 CPU 接口, 可重新配置的输出模式, 可编程的时钟输出, 两个 8 位并行 I/O 接口, PLCC44 封装
Infineon	SAK82C900	2 个独立的 CAN2.0B 节点控制器, 支持 CAN2.0 PartB, 硬件实现网关功能, 32 个信息目标模块, 硬件 FIFO 可对每一个信息目标进行接收过滤, 灵活有效的中断功能, 具有并行和串行两种 CPU 接口, 片内时钟, 具有时钟分频器和时钟输出引脚, 具有休眠和唤醒工作模式, 具有通过 CAN 控制的 I/O 接口。适应汽车环境温度(-40~125)℃, PDS028 封装
Microchip	MCP2510	支持 CAN2.0B, 3 个发送缓冲器, 2 个接收缓冲器, 6 个屏蔽码, 2 个全局屏蔽码, 串行 CPU 接口 (SPI), PDIP/SOICIS、TSSOP20 封装
TOSHIBA	TC190C580	支持 CAN2.0A, 14 发送/接收 (TXRX)缓冲器, 1RX 缓冲器, 15 个屏蔽码, 1 个全局屏蔽
philips	82C200	支持 CAN2.0A, 多种与 CPU 的接口模式, 可编程的传输速率。可编程时钟输出。可编程的输出驱动器模式

4.3 嵌有 CAN 控制器的微控制器

由于 CAN 网络被广泛应用于基于微控制器的系统中, 所以多数微控制器生产商都开发具有 CAN 控制器接口的微控制器芯片, 把 CAN 控制器以接口形式直接集成到微控制器中。使用集成在微控制器中的 CAN 控制器, 应用中避免了硬件上的连接设计, 应用的其他过程与独立 CAN 控制器一样。表 1.6-69 是一些主要的嵌有 CAN 协议控制器的微控制器产品。

表 1.6-69 嵌有 CAN 协议控制器的微控制器(单片机)

生产商	系 列	性 能
Fujitsu	MB90548G	1 个 CAN2.0B 接口, 16 位 CPU, 16 个发送/接收(TX/RX)缓冲器, 16 个屏蔽码, 两个全局屏蔽码, 128KB 掩膜 ROM, 4KRAM, 两个 UART, A/D 接口, 有外部总线接口, QPP100 封装
Fujitsu	MB90594	2 个 CAN2.0B 接口, 16 位 CPU, 16 个发送/接收(TX/RX)缓冲器, 16 个屏蔽码, 两个全局屏蔽码, 256KB 掩膜 ROM, 6KB RAM, 3 个 UART, A/D 接口, 4 路步进电动机驱动接口, QFP100 封装

续表		
生产商	系 列	性 能
Fujitsu	MB90F443G	3 个 CAN2.0B 接口, 16 位 CPU, 16 个发送/接收(TX/RX)缓冲器, 16 个屏蔽码, 两个全局屏蔽码, 128KB 闪存, 6KBRAM, 两个 UART, A/D 接口, 有外部总线接口, QFP100 封装
Infineon	C167	1 个 CAN2.0B 接口, 16 位 CPU, 14 个发送/接收(TX/RX)缓冲器, 一个双 RX 缓冲器, 15 个屏蔽码, 1 个全局屏蔽码, 32KBROM, 11KBRAM, 4 路 PW
Infineon	C515C	1 个 CAN2.0B 接口, 8 位 CPU, 14 个发送/接收(TX/RX)缓冲器, 一个双 RX 缓冲器, 15 个屏蔽码, 1 个全局屏蔽码, 64KBOTP, 11KB RAM, 32KB 或 64KB ROM, 4 路 PWM
Intel	AN87C196	1 个 CAN2.0B 接口, 16 位 CPU, 14 个发送/接收(TX/RX)缓冲器, 一个双 RX 缓冲器, 15 个屏蔽码, 1 个全局屏蔽码
lcronas GmbH	CDC0806E	1 个 CAN2.0B 接口, 8 位 CPU, 16 个发送/接收(TX/RX)缓冲器, 16 个屏蔽码, 1 个全局屏蔽码
lcronas GmbH	CDC1650F	2 个 CAN2.0B 接口, 16 位 CPU, 16 个发送/接收(TX/RX)缓冲器, 16 个屏蔽码, 1 个全局屏蔽码
lcronas GmbH	CDC3207G	3 个 CAN2.0B 接口, 32 位 CPU, 每个 CAN 接口有: 32 个发送/接收 (TX/RX) 缓冲器, 132 个屏蔽码, 1 个全局屏蔽码
Motorola	68HC(7)05X32	1 个 CAN2.0A 接口, 8 位 CPU, 1 个发送缓冲器, 2 个接收缓冲器, 一个 8 位全局屏蔽码, 32Kb ROM
Motorola	68HC08AZ32A	1 个 CAN2.0B 接口, 8 位 CPU, 3 个发送缓冲器, 2 个接收缓冲器, 1 个 32 位全局屏蔽码或 2 个 16 位全局屏蔽码或 4 个 8 位全局屏蔽码
Motorola	68HC912DG128	2 个 CAN2.0B 接口, 16 位 CPU, 3 个发送缓冲器, 2 个接收缓冲器, 2 个 32 位全局屏蔽码或 4 个 16 位全局屏蔽码或 8 个 8 位全局屏蔽码

续表		
生产商	系 列	性 能
Motorola	MC9S12DP256	5 个 CAN2.0B 接口, 16 位 CPU, 3 个发送缓冲器、4 个接收缓冲器, 2 个 32 位全局屏蔽码或 4 个 16 位全局屏蔽码或 8 个 8 位全局屏蔽码
Motorola	MPC565	3 个 CAN2.0B 接口, 32 位 CPU, 48 个发送/接收缓冲器, 48 个全屏蔽码、9 个全局屏蔽码, 1Mbit 闪存
NEC	PHOENIX-PD703116	1 个 CAN2.0B 接口, 32 位 RISC(V850E), 32 个发送/接收缓冲器, 64 个屏蔽码、4 个 29 位屏蔽码, 128KB 掩膜 ROM, 6KB RAM, 7 个 16 位定时/计数器, 2 个 FCAN, 2 个 CSI, 3 个 UART, 2 个 8 通道 10 位 AD, 144 针 QFP 封装
NEC	SCAN-PD703077Y	2 个 CAN2.0B 接口, 32 位 RISC(V850E), 32 个发送/接收缓冲器, 64 个屏蔽码, 4 个 29 位屏蔽码, 256KB 掩膜 ROM, 16KBRAM, 8 个 16 位定时/计数器, 2 个 FCAN, 4 个 CSI, 2 个 UART, 1 个 IZC, 12 通道 10 位 A/D, 100 针 QFP 封装
Philips	P8XC592/8	1 个 CAN2.0A 接口, 8 位 CPU, 1 个发送缓冲器、2 个接收缓冲器, 一个 8 位全局屏蔽码
Philips	XA-C3	1 个 CAN2.0A 接口, 16 位 CPU, 32 个发送/接收缓冲器, 32 个屏蔽码、一个全局屏蔽码, 硬件实现 CANopen、DeviceNet 和 OSEK 的传输层协议
Texas Instruments	TMS320LF2406	1 个 CAN2.0B 接口, 16 位 DSP, 6 个发送/接收缓冲器, 2 个屏蔽码、1 个全局位屏蔽码, 32KB16 位闪存, 2.5KB 16 位 RAM, 16 路 10 位 A/D, 16 路 PWM, 支持 QEP、SCI 和 SPI
TOSHIBA	TMP94FY53F	1 个 CAN2.0B 接口, 32 位 CPU, 15 个发送/接收缓冲器加 1 个接收器, 15 个屏蔽码、1 个全局位屏蔽码, 256kbit 闪存
TOSHIBA	TMPR3903BF	1 个 CAN2.0B 接口, 32 位 CPU, 30 个发送/接收缓冲器加 2 个接收器, 30 个屏蔽码、2 个全局位屏蔽码, 用于驾驶员信息与通信系统的模拟图像控制器

5 LIN

LIN 是一种通用的、串行低成本汽车网络, 它能有效地简化现有的低端复合解决方案, 并可以进一步削减车辆电子系统的开发、生产、服务及后勤成本。LIN 总线的典型应用

是汽车中的联合装配单元, 如车门、车顶、座椅、空调、照明和温湿度传感器等。对于这些成本比较敏感的单元, LIN 可以使诸如智能传感器、制动器或光敏元件等机械元件得到较广泛的应用。

5.1 LIN 技术规范 2.0

最早的 LIN 版本 LIN1.0 发行于 1999 年 7 月, 它在很大程度上是受 VLITE 总线的启发和影响。当时, VLITE 总线主要应用于一些大型的汽车生产企业。LIN 标准在 2000 年做了两次升级, 即 LIN1.1 和 LIN1.2。2002 年 11 月, LIN 协会发布了 LIN1.3, 其中的主要变化是对物理层和节点间兼容性的改进。然而, 最新的版本 LIN2.0 较 LIN1.3 做了更进一步的演变和发展。从集合的概念上讲, LIN2.0 是 LIN1.3 的父集。除了少数情况, 按 LIN1.3 和 LIN2.0 设计的节点间可以完成相互通信。经过不断实践、发展和 SAEJ2602 特别工作组的补充, LIN2.0 已较成熟, 目前已成为开发、设计者的首选。

LIN2.0 规范包括以下几部分: LIN 物理层规范 (PHY)、LIN 协议规范 (PROT)、LIN 诊断和配置规范 (DI-AG)、LIN 应用程序接口规范 (API)、LIN 配置语言规范 (CLS) 和 LIN 节点能力语言规范 (NCL)。

5.1.1 LIN 物理层

LIN 总线是 12V 单总线, 通过一个二极管和一个终端电阻(上拉电阻)连接到电池的正极 V_{BAT} 。各节点以线的方式互相连接。总线驱动器/接收器符合 ISO 9141 标准, 并带有增强特性。总线有两种互补的逻辑值: 电平接近于地电平的显性值, 用逻辑“0”表示; 电平接近于电池电压的隐性值, 用逻辑“1”表示。LIN 物理接口及总线电平如图 1.6-37 所示。

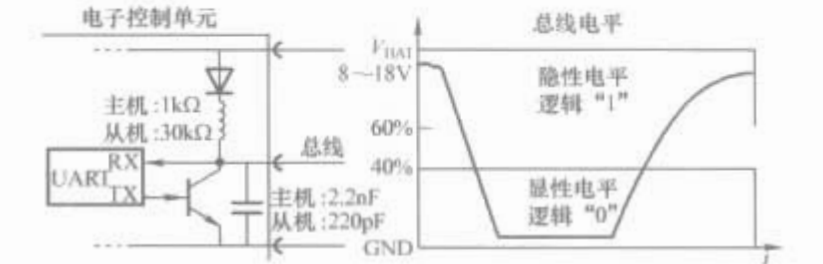


图 1.6-37 LIN 物理接口和总线电平

这里需要注意的是, LIN 规范所指的电压是电子控制单元 ECU(Electrical Control Unit)的外部电气连接电压, 而不是 ECU 内部电压。

由于 LIN 的单线结构, 其波特率峰值为 20kbit/s, 最小为 1kbit/s, 推荐使用的波特率为 2.4kbit/s、9.6kbit/s、19.2kbit/s。总线通信距离应小于 40m, 网络节点数应不超过 16 个。节点过多会使网络的阻抗特性变差(每附加一个节点会降低大约 3% 的网络阻抗)。此外, 在物理层规范中还包括振荡器容差、电磁辐射、位定时要求和同步等方面的定义。

5.1.2 LIN 协议层

5.1.2.1 主机和从机

一个 LIN 簇(包括物理总线在内的一组 LIN 节点)由一个主机节点和多个从机节点组成。所有的节点都包含一个从机任务, 该任务可进一步分为发送任务和接收任务。主机任务只唯一存在于主机节点中。图 1.6-38 给出的是拥有一个主机节点和多个从机节点的 LIN 簇。

主机任务决定什么时候、哪一个帧可以发送到总线上, 从机任务负责提供每一帧的数据传输。

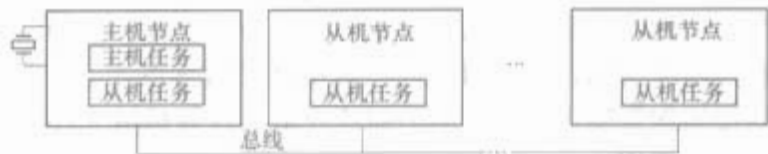


图 1.6-38 LIN 主机和从机

5.1.2.2 LIN 帧及报文传输

在 LIN 总线上传输的实体是帧。一个 LIN 帧由主机任务发送的头部(Header)和从机任务发送的响应(Response)组成。头部包括一个间隔场(Break Field)、一个同步场(Synch Field)和一个保护标识符场(Protected Identifier Field)。响应则由 1~8 个字节的 数据场(Data Field)和一个校验和场(Checksum Field)组成(在 LIN2.0 和 LIN1.3 以前的一些版本中数据场为 2, 4, 8 字节可选)。其中, 间隔场由至少 13 位的显性值(包括起始位)及至少 1 位时间长度的隐性界定符组成; 同步场是一个数据值为 0x55 的字节, 在其所有的位定时中有 5 个下降沿(隐性到显性的跳变)。保护标识符场由两部分构成: 6 位标识符和 2 位奇偶校验。校验和场为数据场和保护标识符场累加和的反码(LIN2.0 增强校验模式)。除间隔场外, 以上各场均为字节场, 即通常的“SCI”或“UART”串行数据格式; 每个字节场的长度为 10 个位时间, 以“显性位”作为起始, 接着是 8 个数据位(首先发送最低位), 最后以一个“隐性位”标志字节场结束。LIN 帧格式如图 1.6-39 所示。

对于在总线上传输的每一帧, 其字节场由字节空间分隔, 头部和响应由帧内响应空间分隔。前后两帧之间则由帧间空间分隔。以上各空间最小值可为 0, 在这种情况下, 可得出传输一帧所需的最小时间:

$$\begin{aligned} T_{\min} &= T_{\text{header}} + T_{\text{response}} \\ &= [(13+1)+10+10] \times T_{\text{bit}} + (10 \times N_{\text{data}} + 10) \times T_{\text{bit}} \\ &= (44 + 10 \times N_{\text{data}}) \times T_{\text{bit}} \end{aligned}$$

式中: N_{data} 为数据字节数; T_{bit} 为位时间。

为便于实现, LIN 规范中并没有对信号空间的最大值进行定义, 只给出了传输一帧所需的时间预算。这个最大时间长度规定如下

$$T_{\max} = 140\% \times T_{\min}$$

LIN 总线的通信由主机任务控制, 它负责调度表及发送帧头。所有从机任务接收帧头并对标识符进行解释, 需要发送的从机任务可根据标识符向总线上发送响应。标识符表示的是内容而不是目的地址, 这种通信概念可以使数据交换以多种方式进行: 从主机节点(利用它的从机任务)到一个或多个从机节点; 从一个从机节点到主机节点或/和其他从机节点。

5.1.2.3 调度表

LIN 协议的一个重要特性就是调度表的使用。调度表是考虑到包含在帧中信号的实时性要求而建立的。调度表能保证总线不会出现过载情况, 也是保证信号定期传输的核心

组件。

调度表位于主机任务中, 它规定每一个帧头对应的标识符及前后两帧信息之间的间隔, 并且负责确保在一种操作模式中的所有帧都有足够的时间进行传输。具体地讲, 调度表中的每个帧都占有一段时间, 这里称作“帧槽”, 这段时间用来在调度表中的下一帧开始之前传输当前帧, 它取决于帧的大小和系统时基。传输一帧所花费的实际时间低于帧槽, 因此在调度表的各表项(与一个帧槽相对应)之间也引入了一些富裕时间。主机应用中可能会用到不同的调度表, 并且根据需要进行选择。

5.1.2.4 网络管理

LIN 簇的网络管理是指 LIN 簇的睡眠和唤醒。其他的网络管理特性, 例如配置检测等功能可放在应用中。

(1)睡眠。通过向总线发送一个第 1 个数据字节为“00H”的主机请求帧(帧标识符=0x3C), 可使一个激活 LIN 簇中的所有从机节点被迫进入睡眠模式。完成这个命令后, 直到总线上出现唤醒信号前将没有总线活动。如果 LIN 总线处于不活动状态超过 4s, 从机节点应该自动进入睡眠模式。在睡眠模式时, 总线呈隐性。

(2)唤醒。处于睡眠 LIN 簇中的任何节点都可以请求唤醒。唤醒请求是通过强制总线处于显性状态 250μs~5ms 的形式被发布的。每一个从机节点都应该检测唤醒请求(一个超过 150μs 的显性脉冲), 并且准备在 100ms 内监听总线命令(从显性脉冲结束边沿开始度量)。

5.1.3 LIN 配置语言和节点能力语言

LIN 配置语言描述的是用于建立一个“LIN 描述文件 LDF(LIN Description File)”所使用的句法和语义。LDF 文件描述整个 LIN 网络的对象和拓扑, 包含监控网络所需的所有信息, 如版本号、波特率、节点、信号、帧和调度表等方面的定义。它不仅可以配置整个 LIN 网络, 而且还可作为开发和分析工具的一个输入。

LDF 文件的句法非常简单, 可直接采用人工编写的方式, 但更鼓励采用计算机工具进行开发。在节点能力语言规范中描述的“节点能力文件 NCF(Node Capability File)”提供了一种自动生成 LDF 文件的方法。值得注意的是, LDF 文件并不具有访问应用程序的功能特征。

LIN 节点能力语言是 LIN2.0 的最新特性, 它的目的是为从机节点提供一种标准化的、机器可读的句法和语义的描述。节点能力语言的使用将会使标准节点的获得变得简单, 并且为利用工具自动生成 LIN 簇提供了可能性, 因此大大增强了 LIN 总线的自动化设计能力。同时它还对同一网络中的相同 LIN 设备定义了重配置机制。这样, 一个 LIN 簇中节点真正的即插即用将会成为现实。一个 LIN 簇的开发工作流程如图 1.6-40 所示。

LIN 工作流程的概念考虑到了设计和开发工具之间无缝链接的实现, 并且它提高了开发的速度和 LIN 簇的可靠性。图 1.6-40 所示的 LIN 簇的开发可分割为三个区域: 设计、

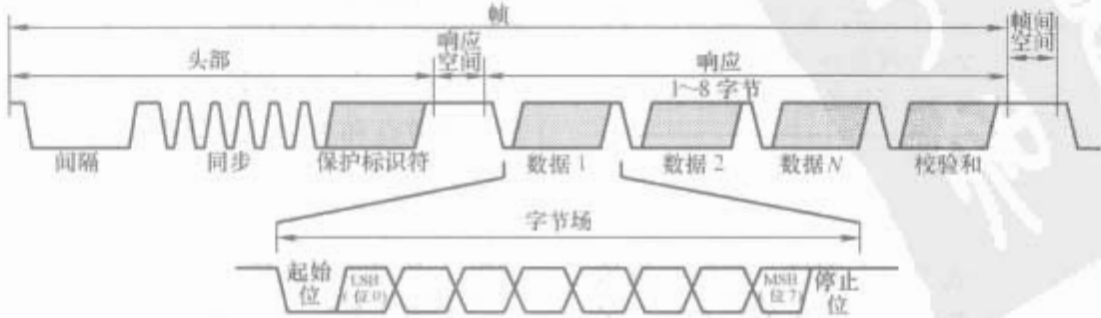


图 1.6-39 LIN 帧格式

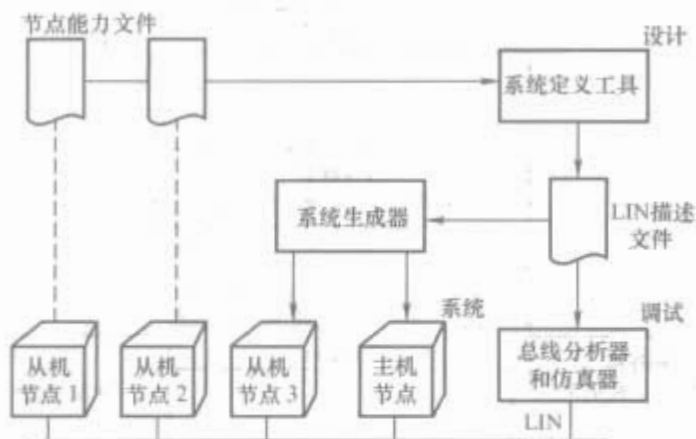


图 1.6-40 LIN 簇的开发

调试和物理系统。这里主要分析设计和调试过程中涉及的几个重要概念。

(1)系统生成。一个 LIN 簇的核心文件是 LDF 文件。LIN 簇中的所有信号和帧都会在这个文件中说明。在这个文件的基础上可以生成 LIN 簇中所有节点的通信驱动。这个过程被称为系统生成。

(2)系统定义。创建 LDF 文件的过程被称为系统定义。当设计一个全新的 LIN 簇时，编写 LDF 文件是定义 LIN 簇通信的一种有效方式。通过使每一个已经存在的从机节点接受 NCF 文件，可实现系统定义步骤的自动化(仅需要在系统定义工具中将 NCF 文件添加到工程中，随之会生成 LDF 文件)。如果同时还需要创建新的从机节点(图 1.6-40 中的从机节点 3)，这时过程会变得相对复杂，每一步的执行均依赖于系统定义工具的使用，然而这并不是 LIN 协议的组成部分。

(3)调试。在系统定义过程中生成的 LDF 文件是调试和仿真的基础。仿真主节点时，要求 LIN 簇必须配置得免于冲突。因此，仿真工具必须有能力去读取系统定义工具生成的重配置数据。

5.1.4 LIN 应用程序接口

LIN 作为 CAN 总线的辅助网络，在设计时与 CAN 的最大区别在于 LIN 总线的设备驱动可通过软件方式实现。换句话说，它完全可以在脱离硬件控制器的情况下完成 LIN 通信的所有功能。为实现上述功能，LIN 规范在 SCI/UART 接口的基础上规定了一套基于 C 语言(其他语言不在协议范围内)的应用程序接口 API 来完成类似读写寄存器功能的操作。在用户为任意的 ECU 建立应用程序时，API 隐藏了 LIN 网络配置的详细情况(例如信号是如何映射到帧的)。用户使用 API 在 LIN 网络中对其他节点进行读/写数据操作，整个过程不关心数据传输的具体细节。

LINAPI 定义了一组函数，为了减少与现有软件冲突的风险而给 LINAPI 函数一个独特的名字空间，所有的函数和类型都有一个独特的前缀“l_”(小写的 L 和一个下划线)。例如，定义的类型：l_bool(1 位信号)，l_u8(1~8 位信号)，l_u16(9~16 位信号)等；函数：l_syt_int(初始化)，l_bool_rd(读调用)，l_flg_tst(标志调用)等。为了提高效率，这些函数大都是静态函数。

从实现的角度来看，整个软件结构可分为 3 层，即应用层、应用接口层和硬件抽象层。API 是中间层，它主要是完成应用层和硬件抽象层的连接，实现帧的发送和接收等。在应用 LINAPI 生成目标映像的过程中需要一个完整的 LDF 文件，但由于 LDF 只关心 LIN 簇的有关方面，因此在这个过程中可能还需要一些其他信息(虽然这并不是 LIN 标准的一部分，但开发工具生产商为配合他们自己的工具链都会将

这部分免费实现)，可以通过工具将它们转换成 ANSI C 文件和 .H 文件。这些文件应当和应用程序一起编译，并将生成的目标代码与 LINAPI 函数库连接，最后得到目标映像。应用 LINAPI 建立通信接口并生成目标映像的流程如图 1.6-41 所示。

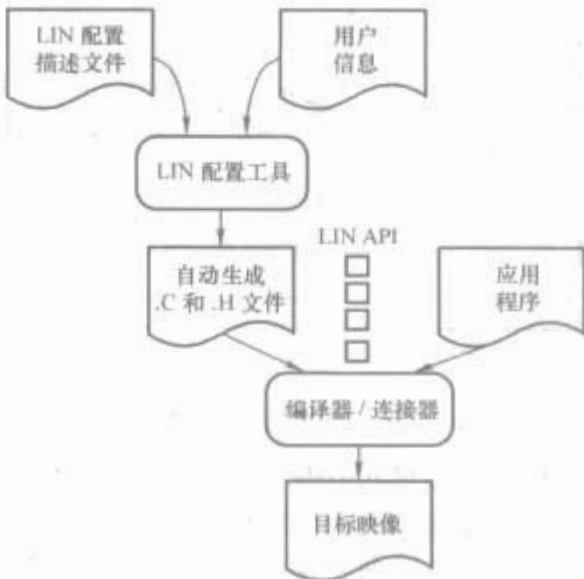


图 1.6-41 应用 LINAPI 生成目标映像流程

5.2 LIN 接口

5.2.1 LIN 总线驱动电路 MC33399

5.2.1.1 MC33399 的基本性能

- (1) 数据传输速度：1~20kbit/s。
- (2) 工作电压：8~18V 直流。
- (3) 短时可承受最大 40V 电压。
- (4) LIN 引脚上的电压范围可以在 (-18~40) V。
- (5) 不会因地线断路而损坏。
- (6) 没上电的节点不会影响 LIN 网络。
- (7) 支持两种工作模式：休眠状态和正常工作状态。
- (8) 休眠状态待机电流 20mA。
- (9) 支持 LIN 总线、MCU 命令、唤醒输入等唤醒方式。
- (10) 电平与 MCU 的 I/O 引脚兼容，与 CMOS 兼容。
- (11) 具有外部电压调节器控制功能。
- (12) 具有与 LIN 标准完全兼容的 LIN 总线门限电压。
- (13) 支持 LIN 协议定义的总线信号切换速率(由高到低电平或由低到高电平的转换速度)。
- (14) 有内部上拉电阻。
- (15) 适应 ISO 9137 标准。
- (16) LIN 总线上承受的 ESD 为 4kV。
- (17) 高的 EMC 性能。
- (18) 工作温度为 (-40~125)℃。

图 1.6-42 所示为 MC33399 的内部结构。

5.2.1.2 MC33399 的引脚功能

- (1) Vsup：电源输入端。这个端通过一个串接的二极管连接到蓄电池正极上，工作电压范围为 7~27V，最高可以承受 40V 电压；当电压低于 7V 时有掉电复位功能，这时切断 TXD 和 LIN 与外面的连接。
- (2) Gnd：地线。MC33399 可以承受 3V 的地电平漂移。
- (3) LIN：与 LIN 网络连接的输入/输出信号线，它可以承受 -18~40V (参照地线) 的电压，信号的切换速度和上升/下降沿的对称性适合 LIN 协议。

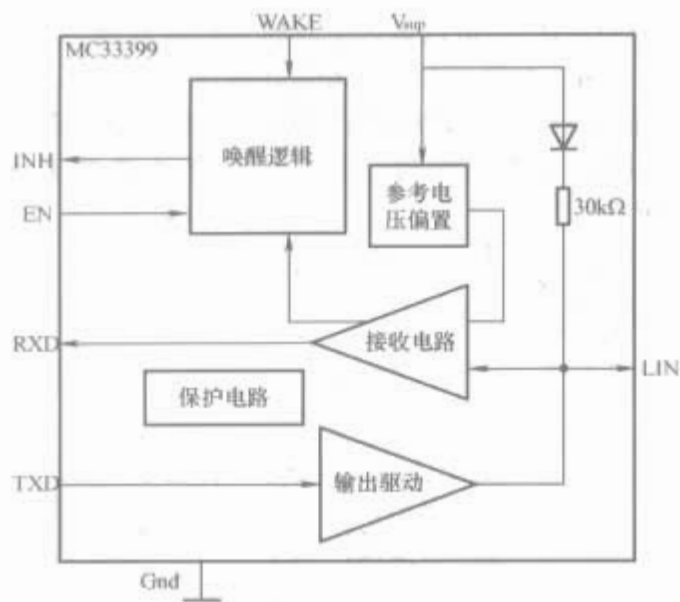


图 1.6-42 MC33399 的内部结构

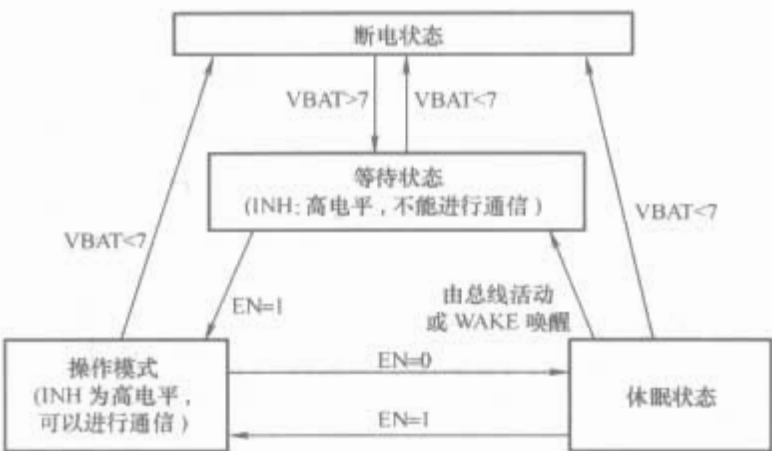


图 1.6-43 MC33399 的状态转换

号，而且电平翻转速率和波形都受到限制，以减少电磁辐射。

TJA1020 的接收器检测到 LIN 总线上的数据流并通过 RXD 引脚将它传送到协议控制器。收发器有低功耗管理模式，它在睡眠模式中几乎不消耗电流，并在错误模式中减少功率消耗 TJA1020 适合用于最高 20kbit/s 的 LIN 传输速率，网络中的节点数可多达 16 个。TJA1020 的主要特征是：

- (1) 波特率高达 20kbit/s。
- (2) 修整输出波形以便电磁辐射非常低。
- (3) 高抗电磁干扰性。
- (4) 在低速应用中 (<10kbit/s) 使用低斜率模式以进一步减少 EME。
- (5) 睡眠模式中的电流消耗极低。
- (6) 在 LIN 对 GND 短路时电池受到放电保护。
- (7) 传输数据 (TXD) 显性超时功能。
- (8) 电池的工作范围广，可以从电压降 (5V) 到跳变启动情况 (27V)。
- (9) 控制输入电平和 3.3V 以及 5V 的器件兼容。
- (10) LIN 从机应用时集成端电阻。
- (11) 睡眠模式下本地和远程唤醒。
- (12) 唤醒源的识别 (本地或远程)。
- (13) 不上电情况下的自动防故障保护，没有反向电流通路。
- (14) 总线终端可防止短路和汽车环境下的瞬变。
- (15) 直接的电池操作，可以防止负载断电、跳跃启动和瞬态。
- (16) 不需要 5V 电源。
- (17) 温度保护。

TJA1020 的框图如图 1.6-44 所示。

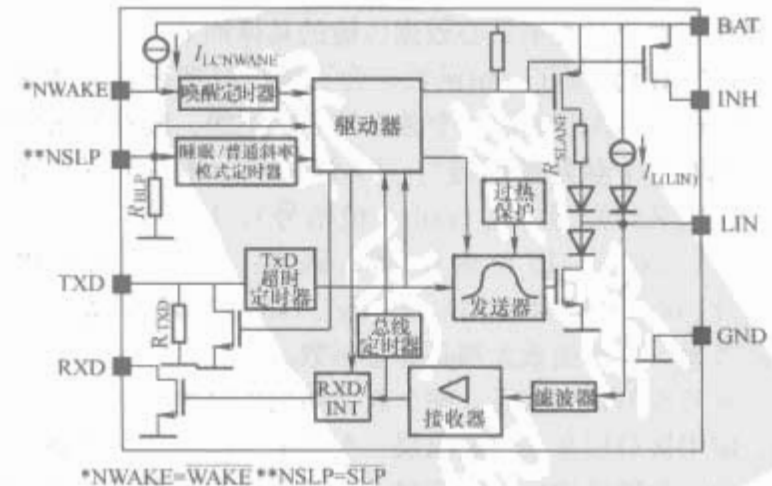


图 1.6-44 TJA1020 的框图

TJA1020 共有四种工作模式，它们分别是普通斜率模式、低斜率模式、准备模式和睡眠模式。这些操作模式的详细情况如图 1.6-45 所示。

(4) TXD：信号输入引脚（由 MCU 输出至 MC33399）。它接收 MCU 发送来的信号，当 TX 为高时，MC33399 输出 (LIN) 驱动三极管关断，输出高状态；当 TX 为低时，MC33399 输出 (LIN) 低状态。

(5) RXD：信号输出引脚（由 MC33399 输出至 MCU）。当 LIN 总线为高时，RX 为高；当 LIN 总线为低时，RX 为低。

(6) EN：MC33399 工作模式控制。当 EN = 1，MC33399 在正常工作模式；当 EN = 0，MC33399 工作在休眠模式或低功耗状态。

(7) INH：外部电压调节器控制端。它一般连接到电压调节器的禁止输入端 (Inhibit Input)。

(8) WAKE：唤醒输入端。高电平输入将唤醒休眠状态的 MC33399。它一般接到一个外部开关上。这个引脚不能开路，当不用时应当接到地上。

5.2.1.3 工作方式

(1) 正常操作模式 (Normal Mode)。在这种模式下，MC33399 具备信息的发送/接收以及其他附属功能。

(2) 休眠模式 (Sleep Mode)。这种模式下，MC33399 处于低功耗状态，不能进行发送/接收操作，只能接受从 LIN 总线上或节点内部或 EN 引脚上来的唤醒信号。

(3) 唤醒方式 (Wake Up)。有三种情况可以把 MC33399 唤醒：

1) LIN 总线活动。LIN 总线状态由隐性到显性的变化，将唤醒休眠的 MC33399。唤醒后，MC33399 自动进入等待状态 (Wait for Normal Mode)，这时它置 INH 为高电平。LIN 节点上电后，根据应用程序，节点的微控制器通过 EN 设置 MC33399 为操作状态或休眠状态。

2) 节点内部通过 EN 信号唤醒。唤醒后，MC33399 将直接进入操作状态。

3) 由 WAKE 引脚信号唤醒。

MC33399 各种状态之间的转换关系和转换条件如图 1.6-43 所示。

(4) 上电过程 (Power Up)。当系统上电时，MC33399 自动进入等待状态 (Wait for Normal Mode)，这时它置 INH 为高电平状态。节点的微控制器上电后，根据应用程序通过 EN 设置 MC33399 为操作状态或休眠状态。

5.2.2 LIN 总线收发器 TJA1020

TJA1020 收发器是一个物理媒体连接，它是 LIN 主机/从机协议控制器和 LIN 传输媒体之间的接口。协议控制器输入引脚 TXD 的发送数据流被 LIN 收发器转换成总线信

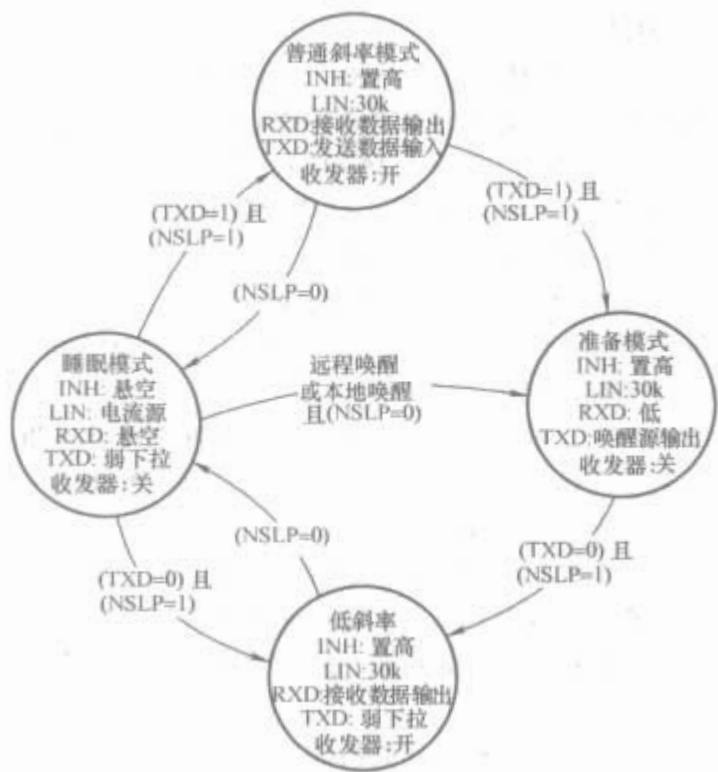


图 1.6-45 TJA1020 状态图

5.2.2.1 睡眠模式

TJA1020 的睡眠模式使 LINECU 的功耗非常低。这是由于收发器本身的电流消耗非常低，而且通过 INH 输出关断了外部电压调节器造成的。因此，睡眠模式中，INH 引脚悬空。

尽管功率的消耗极低，但 TJA1020 仍能识别 LIN 引脚的远程唤醒和 NWAKE 引脚的本地唤醒并将模式切换到准备模式。而且，TJA1020 还可以通过引脚 NSLP 直接激活普通或低斜率模式，这对于单片机的电源不是由 INH 输出控制的应用非常有用。

TJA1020 收发器在接收器 (LIN) 的输入、本地唤醒输入 (NWAKE) 和睡眠控制输入 (NSLP) 使用滤波器和/或定时器，以防止由汽车瞬态或 EMI 造成的不必要的唤醒。因此，所有的唤醒都要维持一段时间 (t_{BUS} , t_{WAKE} , $t_{gotonorm}$)。

如果睡眠输入引脚 NSLP 的低电子维持时间至少 $t_{gotonorm}$ (见图 1.6-46) 而且这段时间内没有发生唤醒事件，则 TJA1020 进入睡眠模式。这段滤波时间可以防止 TJA1020 由于 EMI 产生的不必要的瞬态而进入睡眠模式。如果引脚 LIN 和/或 NWAKE 连接到地也可以激活睡眠模式，譬如对地短路。



图 1.6-46 睡眠模式时序图

睡眠模式中，连接引脚 LIN 和 BAT 的内部从机端电阻 R_{SLAVE} 禁能；可以将它看作是一个弱电流源。当 LIN 总线对地短路时，它将电流的消耗减到最低。

5.2.2.2 准备模式

准备模式是一个中间模式，只有当 TJA1020 在睡眠模式时产生远程和本地唤醒时才会进入准备模式。准备模式中，INH 引脚输出高电平，将外部电压调节器激活。另外，连接引脚 LIN 和 BAT 的内部从机端电阻 R_{SLAVE}，激活 (接通)。

TJA1020 用 RXD 引脚的低电平来标志准备模式。它也

可以作为单片机的唤醒中断请求。另外，唤醒源可以用引脚 TXD 的下拉来标志。远程唤醒事件会在引脚 TXD 产生弱下拉，而本地唤醒事件将在 TXD 引脚产生强下拉。外部的上拉电阻由所使用的单片机来决定。

图 1.6-47 和图 1.6-48 是远程和本地唤醒的时序图，以及在引脚 RXD 和 TXD 的特定输出 (仅仅在总线唤醒挂起时)。如果 LIN 总线在一个隐性总线电平之后的显性电平至少持续 t_{BUS} ，则可以通过 LIN 总线检测到远程唤醒。如果低电平持续了至少 t_{NWAKE} ，则 NWAKE 引脚的下降沿将引起本地唤醒。

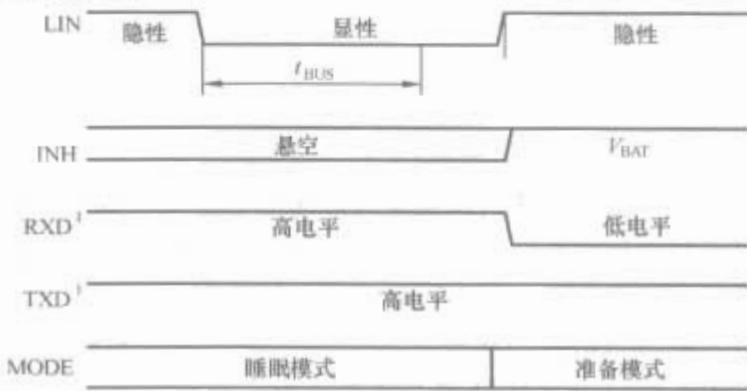


图 1.6-47 远程唤醒的准备模式时序图

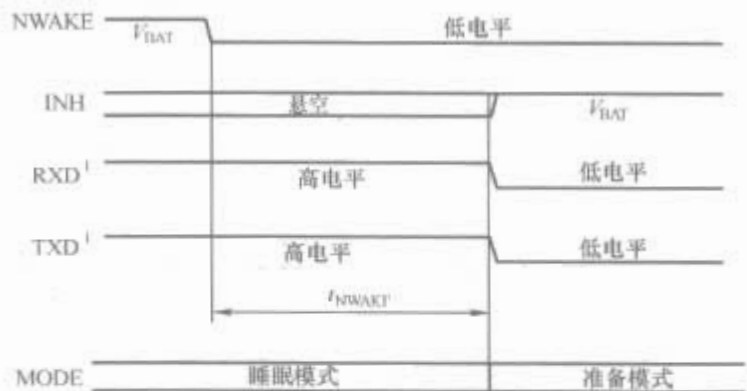


图 1.6-48 本地唤醒的准备模式时序图

5.2.2.3 普通斜率模式

普通斜率模式用于通过 LIN 总线发送和接收数据。总线数据流由接收器转换成数字位流并在 RXD 引脚输出到单片机。RXD 引脚的高电平表示 LIN 总线是隐性电平，而低电平表示 LIN 总线是显性电平。TJA1020 的发送器将在 TXD 输入的单片机数据流转换成 LIN 总线信号波形，并加以修整，使 EME 达到最小。TXD 输入的低电平会使 LIN 总线是显性电平。而高电平性则使 LIN 总线是隐性电平。

普通斜率模式中，内部从机端电阻 R_{SLAVE} 将 LIN 总线引脚拉高。引脚 INH 的电池高电平使外部电压调节器保持接通。

将引脚 NSLP 和 TXD 置高电平，并持续至少 $t_{gotonorm, max}$ 也可以进入普通斜率模式。当 $t_{gotonorm}$ 一超时会执行模式转换。图 1.6-49 是从睡眠模式或准备模式转换成普通斜率模式的时序图。



图 1.6-49 普通斜率模式时序图

5.2.2.4 低斜率模式

如果 LIN 系统的速率低于 10kbit/s，可以使用低斜率模

式。它和普通斜率模式相比，可以进一步减少（普通斜率模式中）已经非常低的 EME。因此，它和普通斜率模式的唯一不同点是总线信号的过渡时间（transition time）。低斜率模式的过渡时间是普通斜率模式过渡时间的两倍，如图 1.6-50 所示。

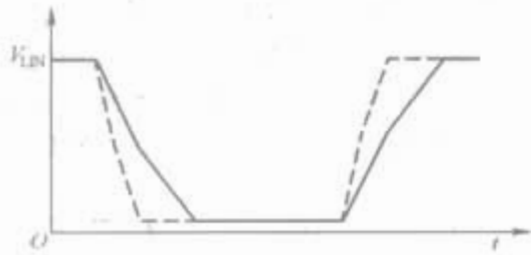


图 1.6-50 低斜率模式减少 LIN 总线斜率
——低斜率模式；--- 普通斜率模式

低斜率模式只能通过睡眠或准备模式进入，不可能直接从普通斜率模式直接转换成低斜率模式。当引脚 TXD 的低电平和引脚 NSLP 的高电平至少维持了 $t_{gotonorm,max}$ ，TJA1020 进入低斜率模式。当 $t_{gotonorm}$ 超时会执行模式转换。图 1.6-51 是从睡眠模式或准备模式转换成低斜率模式的时序图。



图 1.6-51 低斜率模式时序图

6 基于时间触发的车上网络协议标准

随着车上电子控制和通信系统越来越复杂，以及“线控”（By-wire）系统的增加，对车上网络提出了新的性能要求。现在已经被广泛应用的一些基于事件触发的总线系统已经不能满足要求，尤其是不能满足分布式控制系统对通信时间离散性及延迟的要求。在这样的背景下，出现了一些数据传输速度快、可靠性高、通信时间离散度小并且延迟固定的车上通信网络标准，这些标准都支持时间触发通信方式。到目前为止，比较典型的这类车上网络协议标准有 FlexRay、byteflight、TTP/C 和 TTCAN 等。

6.1 FlexRay

FlexRay 是一个为车上应用系统高层网络和“线控”系统开发的通信标准。它最突出的特点是，在提高数据传输率的条件下，能够满足汽车安全要求的可靠性指标。车上“线控”系统要求网络具有传输速度快、可靠性好和支持分布控制的性能。基于这一目的，BMW、Daimler Chrysler、Philips Semiconductors、Motorola、Bosch 等几大汽车公司和半导体元件公司成立了 FlexRay 共同体（FlexRay Consortium），建立了 FlexRay 系统标准，并且组织开发一系列适合这个标准的软硬件。FlexRay 不仅仅是一个通信协议，而且包括特殊定义的高速发送和接收驱动器，以及各种 FlexRay 元件的硬件和软件接口标准。FlexRay 较全面地定义了一个网络化汽车通信过程的信息格式和功能，具有良好的可靠性、可用性、灵活性以及传输速率等汽车系统要求的关键指标。

6.1.1 概述

FlexRay 共同体设计 FlexRay 系统标准的出发点是具有高数据传输率、适合于汽车复杂的控制应用、支持分布式控制系统和减少车上通信系统网络。在汽车控制系统中，FlexRay 将被用于底盘控制、车身控制和动力传动系统控制。FlexRay 要求实现以下指标：

- (1) 支持静态通信（Deterministic Communication）和动态事件驱动的通信（Dynamic Event Driven Communication）两种通信规范。
- (2) 在一个通信周期内，有可配置的静态和动态两个部分，也支持只有动态或只有静态部分通信周期的传输方式。
- (3) 灵活的可扩展性。
- (4) 高的数据传输速率和频带宽度效率。
- (5) 灵活的容错能力，支持单通道和双通道操作。
- (6) 可靠的错误检测功能，包括时域的总线监测机制和数字域的 CRC 校验。
- (7) 支持电气的和光纤的物理接口。
- (8) 静态传输在时域上具有静态的指标性能，支持时间驱动的传输方式。
- (9) 静态传输时，通过容错时钟同步算法（Fault Tolerant Clock Synchronization Algorithm）实现全局定时。
- (10) 动态传输部分要求实现事件驱动的动态通信能力。
- (11) 动态传输具有灵活的带宽（在运行中对不同节点分配带宽）分配能力。
- (12) 动态传输部分不影响静态传输部分。
- (13) 支持容错功能，但可接受没有容错能力的节点和连接方式。
- (14) 支持单一故障下不降低系统功能的结构。
- (15) 通信协议与网络拓扑结构相关性小。
- (16) 在要求高可靠性和容错能力的应用中，具有通信介质可以由一个通信控制器独占的独立总线保障机制。
- (17) 在初始化过程和运行过程中，具有硬件和配置数据的检测错误机制（EDMs）。当发现严重故障时，终止控制器和发送接收器的正常操作并立即向主机发送错误信令。
- (18) 采用位填充编码。
- (19) 满足汽车环境要求和质量要求的控制器和物理层。
- (20) 配置数据能够由主机读写，具有在运行中禁止写入配置数据的功能。
- (21) 当使用光纤物理层时，逻辑线路与“byteflight”兼容。

FlexRay 系统适用于多种网络拓扑结构，包括总线结构、星形结构以及多星形结构。它的数据传输速度达到 10Mbit/s，节点数可达 64 个。

BMW、DaimlerChrysler、Philips Semiconductors、Motorola 和 Bosch 等公司正在与 MicroSys 公司合作开发 FlexRay FPGA 的硬件测试平台，这是在没有生产出支持 FlexRay 的半导体元器件之前开发基于 FlexRay 的控制单元的必要工具。它可以使基于 FlexRay 的控制单元在支持 FlexRay 的元器件一上市就投入生产。Motorola 公司将生产独立 FlexRay 控制器芯片，并考虑把 FlexRay 控制器集成到它的 16 位和 32 位微控制器中；2002 年生产出工程样品，2003 年出产品级样品。Philips 和 Semiconductors 公司开发 FlexRay 发送接收器测试芯片，它将生产适于汽车应用的独立 FlexRay 发送接收器。Vector-Informatik 和 IXXAT 公司开发了 FlexRay 分析软件，为分析和测试 FlexRay 系统提供了有利手段。DECOMSYS 公司开发了 FlexRay 系统的一个

Matlab/Simulink 工具 xCom, 它含有一个从仿真的 FlexRay 系统读取信息和向其写入信息的模块; 利用这个模块可以进行基于 FlexRay 的分布控制应用系统的开发工作。DECOM-SYS 公司还开发了一个设计基于 FlexRay 系统的设计和配置工具 xDesigner, 为基于 FlexRay 的应用系统设计提供了方便。FlexRay 将被广泛应用于汽车控制系统的高端网络。

6.1.2 基本概念

FlexRay 的分层结构如图 1.6-52 所示。这个结构中, 物理层定义了信号的实际传输方式, 包括在时域上检测通信控制器故障的功能; 传输层是 FlexRay 协议的核心, 它的功能是从表示层获得节点要发送的信息和把网络上接收的信息传送给表示层; 传输层负责定时、同步、信息包装、错误检测与错误信令和故障状态界定; 表示层完成信息过滤、信息状态处理以及通信控制器与主机的接口; 应用层由应用系统定义。



图 1.6-52 FlexRay 的分层结构

6.1.2.1 基本术语

- (1) 时间片 (Slot): 是 FlexRay 对通信过程划分的时间段。在这些时间段上, 控制器按一定要求或条件访问通信媒体。
- (2) TDMA (Time Division Multiple Access): 分时多路复用访问方式。FlexRay 支持 TDMA 媒体访问方式。
- (3) 通信周期 (Communication Cycle): FlexRay 一个信息传送的周期称为通信周期。一个通信周期由静态和动态两个部分构成, 静态和动态的两个部分任何一个都可以是空的。
- (4) 通信周期静态部分 (StaticPart): 在这一部分中, 信息按照固定的、事先定义的 TDMA 方式传送。
- (5) 通信周期动态部分 (Dynamic Part): 在这一部分, 信息按最小时间片算法 (Mini-slotting Algorithm) 发送; 按信息标识符的优先级确定发送的顺序。
- (6) ECU 节点: 连接到网络上的具有一定应用功能的节点。
- (7) 网络星节点 (Active Star): 只具有网络功能的通道连接节点。
- (8) 总线监控逻辑 (Bus Guardian): 用于避免通道定时错误的一个独立部分, 它与一个通信控制器和一个微控制器相连; 总线监控逻辑必须独立于其他的通信控制器。
- (9) 通道 (Channel): 在 FlexRay 系统中, 通道指通信控制器的物理连接。
- (10) 节点主机 (Host): 一个节点中执行应用程序的微控制器。

6.1.2.2 节点结构

如图 1.6-53 所示, FlexRay 网络上一个 ECU 节点由微控制器 (节点主机)、通信控制器、总线管理逻辑、总线驱动逻辑 (发送/接收驱动器) 和电源系统几个部分组成。通

信功能主要由通信控制器、总线管理及驱动逻辑以及这些部分与主机的接口完成。

FlexRay 网络节点具有以下特点:

- (1) ECU 节点中, 一个通信控制器连接到一个或两个总线驱动器, 即一个节点可以连接到一个或两个总线通道上。
- (2) 节点可以进入休眠态。
- (3) 处于休眠态的节点可以由总线事件唤醒。
- (4) 节点的总线活动可以由 ECU 关闭。
- (5) 节点与电源常连接。

网络星节点是一个只有网络功能的节点, 没有主机和通信控制器。一个星节点有一个以上总线驱动器, 可以由总线唤醒和由总线关闭。

通信控制器有两种结构, 一种是使用两个冗余的物理通信通道, 另一种是只用一个物理通道。

6.1.2.3 网络拓扑结构

图 1.6-53 是一种适合 FlexRay 系统的网络拓扑结构, 一个节点可以连到通道 1 和通道 2 上, 也可以只连到其中的一个通道上。

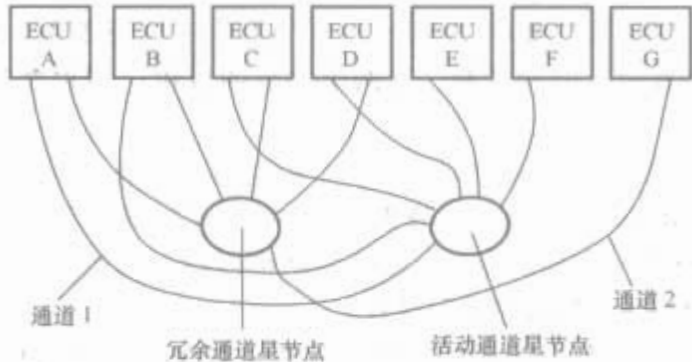


图 1.6-53 FlexRay 网络拓扑结构

6.1.2.4 信息的传送

FlexRay 按周期组织信息的传送。在传送信息时, 一个通信周期有静态的和动态的两个部分, 每个部分都可以为空。如图 1.6-54 所示, 通信周期由一个通信起始符作为开始标记, 后面是一系列发送时间片 (Sending Slot)。每个发送时间片由节点的标识符作为标志, 在两个通道上是相同的。在静态部分, 发送时间片时间长度是固定 (TDMA 方式) 的, 连接到两个通道上的节点同时向两个通道发送信息。连接到不同通道上的只与一个通道连接的节点, 可以在静态部分使用同一个标识的时间片。所有节点执行时钟同步算法, 但只考虑静态部分的信息。在不同的通道上, 同一个时间片可能发送不同的信息。



图 1.6-54 一个 FlexRay 通信周期

6.1.3 FlexRay 协议

6.1.3.1 基本要求

FlexRay 协议满足以下特性:

- (1) 通信协议与数据传输速度无关。
- (2) 通信控制器支持 5Mbit/s 的数据传输速度。

- (3) CRC 校验码的海明距离 (Hamming Distance) 为 6。
- (4) 通信控制器应当能在 Byteflight 环境下工作。

6.1.3.2 信息传送

由于一个 FlexRay 通信周期的静态和动态部分可以是空的, 所以一个通信周期可以有三种形式: 纯静态的 (动态部分为空)、静态动态混合 (既有静态部分又有动态部分) 的和纯动态的 (静态部分为空)。FlexRay 通信周期的起始符有正常情况起始符和报警情况起始符两种。当前通信周期由通信周期计数器的值决定, 这是一个只增计数器, 对通信周期进行计数。通信周期的长度由控制器配置数据决定, 可以由应用程序设置。只有总线处于允许状态下, 控制器才可以起动一个通信周期。一个控制器信息的内容可以在不同通信周期特定时间片上多发送。静态部分和动态部分信息的传送方式是不同的。

- (1) FlexRay 静态部分需满足以下要求:
 - 1) 如果一个通信周期的静态部分不空, 它的时间片数 (NUMBER-OF-SLOTS) 应当满足
$$\text{STATIC-SLOTS-MIN} \leq \text{NUMBER-OF-SLOTS} \leq \text{STATIC-SLOTS-MAX}$$
式中: STATIC-SLOTS-MIN 和 STATIC-SLOTS-MAX 分别为最小和最大时间片数, 这两个多数叫以由应用程序编程设置。

- 2) 在一个通信周期内, 一个控制器可以有 1~STATIC-SENDING-SLOTS 个静态时间片。STATIC-SENDING-SLOTS 为一个控制器一个通信周期可以拥有的最大时间片数, 可以由应用程序编程设置。
- 3) 静态部分分为一系列时间片, 在每一个时间片内, 最多只允许有一个控制器向通道上发送一个信息。通信周期的静态部分按 TDMA 方式访问媒体。
- 4) 所有静态部分时间片的长度相同, 由配置参数 SKOT-LENGTH 定义。这个长度可以初始化时编程设置, 但运行时是固定的。

- 5) 在一个通信周期, 第一个时间片之前是通信起始符。
 - (2) FlexRay 动态部分满足以下要求:
 - 1) 在一个通信周期内可以没有或有几个动态时间片。
 - 2) 根据 Byteflight 协议, 在一个通信周期内, 静态部分具有优先访问总线权。
 - 3) 在通信周期的动态部分, 采用最小时间片 (Mini-Slotting Scheme) 和标识符优先的仲裁策略, 发送的信息标识符优先的控制器获得总线。
 - 4) 动态部分的信息长度在运行时是可变的。
- FlexRay 动态部分是按着 Byteflight 协议传送的。

6.1.3.3 信息帧格式

- FlexRay 信息帧格式满足以下要求:
- (1) FlexRay 帧格式与 Byteflight 协议兼容, 以保证 FlexRay 系统与 Byteflight 结构兼容。
 - (2) 一个信息帧中, 数据域的第一个部分必须是周期计数器, 它是系统的全局时钟基准。
 - (3) 信息帧的格式见表 1.6-70 和表 1.6-71。

表 1.6-70 有周期计数的帧格式								
域	标识符	重复标志	同步	数据长度	周期计数	数据	CRC 码	0
名称	ID	MUX	SYNC	LEN	CYCLE	DATA	CRC	0
长度 (位)	10	1	1	4	8	0~11	15	1

表 1.6-71 没有周期计数的帧格式							
域	标识符	重复标志	同步	数据长度	数据	CRC 码	0
名称	ID	MUX	SYNC	LEN	DATA	CRC	0
长度 (位)	10	1	1	4	0~11	15	1

标识符域 (1D) 长度为 10 位, 对于通信周期静态部分的信息, 它定义时间片位置; 对于动态部分的信息, 它定义信息优先级。在一个信息群中, 每个信息帧的标识符必须唯一, 一个控制器发送的信息可以拥有一个或多个标识符。

重复标志 (MUX) 长度为 1 位, 它可以实现一个节点利用同一个标识符发送不同长度的数据。

同步域 (SYNC) 长度为 1 位, 这一位为时钟同步位, 并用来指示后边的位序列是周期计数还是数据。

数据长度域 (LEN) 长度为 4 位, 给出数据域的字字节数。当这里的数据值大于 12 时, 数据字节长度仍为 12 字节 (对于有周期计数的格式, 最大为 11 字节)。FlexRay 控制器可以发送数据长度为零的信息帧。

周期计数域 (CYCLE) 在有周期计数的格式中为 8 位。所有节点的控制器, 在每一个新周期开始时累加周期计数值。

CRC 码给出一帧信息的 15 位循环冗余校验码。

在将来的应用中, FlexRay 一帧信息的数据域有可能增加到 240 字节。

6.1.4 FlexRay 的时钟同步

- FlexRay 具有以下时钟同步功能:
- (1) 本地时钟与全局系统时间基准同步。
 - (2) 如果有足够多的节点, 可以承受多至两个的不同步故障。
 - (3) 在纯静态格式和混合格式具有时钟同步容错能力。
 - (4) 在纯动态格式不具备时钟同步容错能力。
 - (5) 支持单通道、双通道、单双混合通道网络结构的时钟同步。
 - (6) 只有在静态方式的节点参与时钟同步。
 - (7) 所有节点可以使用全局时钟。

6.2 Byteflight

Byteflight 网络通信协议是由 BXIW AG、Motorola、ELMOS、Infineon、Siemens EC、Steinbeis Transferzentrum、Prozessautomatisierung 以及 IXXAT 等公司提出的高速汽车网络系统协议, 目的是满足汽车系统需求的高速安全网络标准。到 2001 年底, 已经有一些支持 Byteflight 协议的软件和硬件产品, BMW 公司已经在其 BMW7 了系列上使用了基于 Byteflight 协议的系统, 它被用于车上被动安全系统相关电控单元的通信和线控换挡系统 (Shift-By-Wire)。美国的航空电子系统公司 Avidyne, 在比较了包括 CAN 和 TTP (时间触发通信协议) 在内的 27 种网络协议后, 选择 Byteflight 作为其新产品的网络协议, 并期望将来引入 FlexRay 系统 (FlexRay 使用 Byteflight 作为它动态部分的信息传送控制协议)。Motorola 公司已经生产出了集成有 Byteflight 协议控制器的微控制器芯片 MC9S12DB128。ELMOS 公司生产了独立的 Byteflight 协议控制器 E100.38 以及星节点连接器 (Active Star Coupler) E100.39。Infineon 公司已经生产出了光纤 Byteflight 发送/接收驱动器 BFT003。Byteflight 网络通信协议也是 FlexRay 的基础之一。

6.2.1 特性

- Byteflight 协议具有以下特性:
- (1) 位传输速度 10Mbit/s, 净数据传输速度 5Mbit/s。

- (2) 最大数据刷新时间 250μs。
- (3) 采用 NRZ 带起始和终止位的编码方式。
- (4) 协议本身没定义节点数限制，目前（2001 年底）的星节点连接器可以连接 22 个节点。
- (5) 协议对网络拓扑结构没有定义，第一个汽车上的应用采用了星型结构。
- (6) 信息传送时不需指明接收端地址，信息自身标识决定接收节点。
- (7) Byteflight 综合了同步和异步总线的优点。
- (8) 总线的访问是完全由协议控制器硬件实现的时间触发控制。
- (9) 即使总线在最大负载时，也能保证一定数量最高优先级信息的及时传送，即对于最高优先级的信息，总线不会“堵塞”。
- (10) 在总线负载低时，低优先级的信息可以像异步方式一样访问总线。
- (11) 可以通过相同的物理媒体发送一个报警状态，这个状态可以被两个独立的部件检测到。

Byteflight 的结构如图 1.6-55 所示，星点连接器与每一个节点之间，都是通过一个独立的发送/接收器连接。按照 ASICE100.39 方式，星点连接器从每一个节点接收信号，把

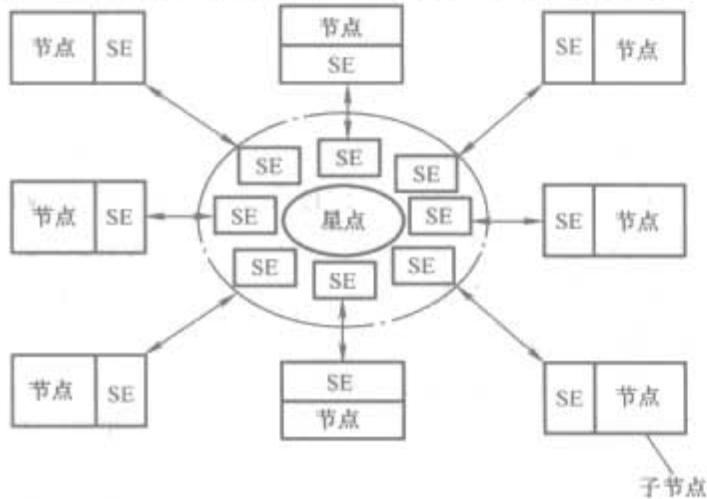


图 1.6-55 Byteflight 的结构

Byteflight 系统每个节点都可以通过软件设置为总线管理器（Bus Master），但在一个总线上只能有一个总线管理器。它在每个通信周期时间（ t_{cyc} ）输出同步脉冲（Sync Pulses），连接到总线上的其他从节点（Bus Slaves）利用这个同步脉冲进行内部同步：同步脉冲有 t_{syn_a} 或 t_{syn_n} 两种宽度， $t_{syn_n} > t_{syn_a}$ ， t_{syn_a} 指示报警情况：总线管理器节点处理器，通过设置报警位（Alarm Bit）决定是否发送报警指示；当这个处理器设置了报警位，在 1023 个 t_{cyc} 时间后，大约 256ms，将由总线控制器自动清除报警位，使同步脉冲又恢复为 t_{syn_n} 。每次报警位被置位，不论上次计数是否结束。计数就重新开始：如果同步脉冲因故障停止，其他节点可以由本节点的微控制器设置为时钟管理器（后备）节点，这时它可以发送同步时钟。另

这些信号逻辑“与”以后再发回给各个节点。连接总线可以是光缆也可以是电缆。如果使用光缆连接，必须使用星型拓扑结构；使用电缆连接时，可以使用总线结构和星型结构。由于传输速度和物理层的原因，Byteflight 不保证所有节点接收信息的一致性。在设计高层信息发送软件时必须考虑到这个问题，必要时采用适当的应答方法。

6.2.2 Byteflight 协议

在 Byteflight 总线上，信息是按字节组织的，Byteflight 系统的信息传送格式如图 1.6-56 所示，各部分的含义如下：

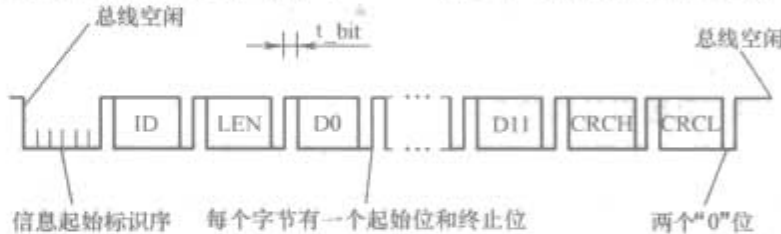


图 1.6-56 Byteflight 信息格式

- (1) ID：标识符域，8 位，决定一个信息的优先级（数值越小优先级越高）。
 - (2) LEN 的前 4 位（BIT 0~3，低位）：数据字节长度域，给出数据域的字节数。
 - (3) LEN 的后 4 位（BIT 4~7，高位）：附加信息/或数据。
 - (4) D0~D11：数据域，最大 12 个字节，最小 0 字节。
 - (5) CRCH/CRCL：循环冗余校验码域，由 15 位 CRC 校验码和最后一个。位构成两个字节，CRCH 为高字节，CRCL 为低字节。
- 一帧信息最后为两个“0”位的结束标志。在总线空闲时，连续 6 个显性位标志一个传送开始。一帧信息中，ID、LEN、D0~D11、CRCH 和 CRCL 中每个字节的格式如图 1.6-56 所示。信息从高位开始发送，每个字节以一个逻辑“1”位开始，然后是 8 个数据位，最后由一个逻辑“0”结束。

图 1.6-57 是 Byteflight 同步信号和信息传送的结构。

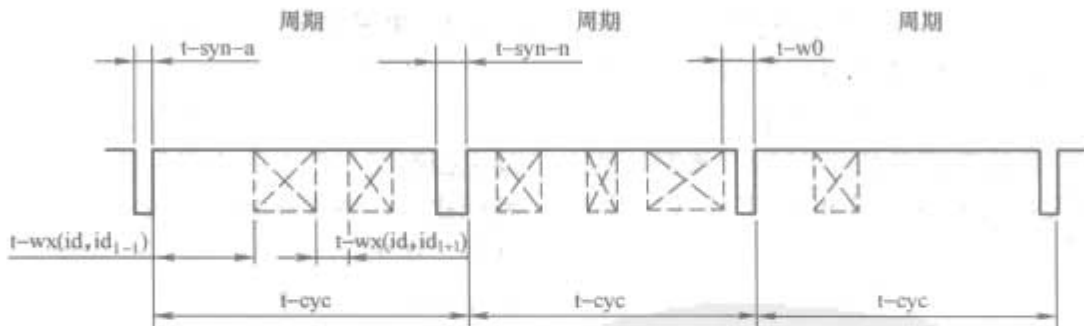


图 1.6-57 Byteflight 一个通信周期

外，可以使用冗余结构，也就是同时两个 Byteflight 系统并行工作。如果一个发生故障，另一个可以继续工作。 t_{wx} 是总线上两个信息的间距，表示前一个信息帧到当前信息帧标识符域的时间。

6.2.3 Byteflight 错误处理

Byteflight 协议定义的错误类型和采取的处理过程如下：

- (1) 信息格式错：包括 CRC 校验错、起始位或终止位错、位采样错误、在最小总线空闲时间 $t_{idle\ min}$ 期间内出现总线活动等异常情况。一个节点在接收状态时，只要检测出这类错误，总线就进入被监控状态（Monitored）。如果总线空闲状态持续 11 位以上，则可以继续接收信息。节点在发送状态时，只要检测到这类错误，总线就进入空闲状态，起动信息帧间的等待时间定时 t_{wx} ，并且总线进入被监控

状态。如果总线空闲状态持续 11 位以上, 1_{vx} 时段有效, 则可以发送信息; 如果在不到 11 位的时间内又有总线活动, 则触发新的错误。

(2) 同步脉冲提前: 同步脉冲周期在最小同步脉冲周期 t-cyc_{min} 之前结束, 这时仍使用同步脉冲同步。

(3) 同步脉冲丢失: 同步脉冲周期在最大同步脉冲周期 t-cyc_{max} 之后仍未结束, 这时停止发送和接收, 直到下一个同步脉冲到来后再开始总线活动。

(4) 非法脉冲: 出现协议定义的允许值之外的脉冲信号, 这时停止发送和接收, 直到下一个同步脉冲到来后再开始总线活动。

6.2.4 总线事件的检测

当总线管理器检测到总线上出现同步脉冲、报警脉冲、有信息发送或接收了信息以及发生错误时, 就会产生中断请求或设置状态标记。

节点通信控制器内部事件发生或状态变化时, 应当给出延续时间不小于 50ns 的信号标志。

6.2.5 Byteflight 协议控制器

Motorola 公司的微控制器 MC68HC912BD32 集成了 Byteflight 控制器接口, 可以直接用作 Byteflight 节点控制器。它采用 80 脚的 QFP 封装, 在引脚和软件上与 Motorola 公司的 68HC9t2B 系列兼容; 具有 1KB 的 RAM、768B 的 EEPROM 和 32KB 闪存。它的 16 个信息缓冲寄存器可以自由地设置为发送缓冲寄存器、FIFO 接收缓冲寄存器或专用接收寄存器。

6.3 TTP/C

TTP/C (Time Triggered Protocol SAE Class C) 是一个基于时间触发的、集成的、有容错功能的实时网络通信协议, 其中 C 表示是 SAE 的 C 级网络。TTP 最初是由维也纳工业大学开发的一种用于实时分布式控制系统的网络协议。Audi、Volkswagen 和 Delphi 等公司在寻求适合汽车上控制系统的网络标准时, 选用 TTP/C 作为下一代汽车“线控”系统的网络协议, 并形成所谓 TTP/C 共同体 (TTP/C Consortium); Honeywell 是这个共同体中的电子器件生产公司。汽车“线控”系统对控制动作的实时性和系统可靠性要求非常高, 要求用于“线控”系统的网络信息传送时间不确定性小, 设计中信息传送时间可预测。因此, 使用时间触发的协议是有利的。这也是 TTP/C 共同体选用 TTP 协议的原因。

6.3.1 TTP/C 的特点

TTP/C 网络通信是时间触发的, 系统根据一定的已知原则自动安排信息的发送时间。网络上每个节点的控制器在信息描述表 (Message Descriptor List, MEDL) 中保存有自己的控制数据, 这些控制数据定义了这个控制器发送信息的时间。这种传输机制使 TTP/C 具有以下一些特点:

(1) 信息传输延时小, 时间抖动 (Jitter, 时间的不确定性) 小。

(2) 应用系统受网络结构影响小, 软件系统可以独立开发, 在最后阶段再与硬件集成。应用系统的移植性好, 性能测试比较方便。

(3) 在使用同一个总线的一个簇 (Cluster) 中, 所有的无故障节点能够获取相互一致性信息和时间信息。

(4) 采用分布式容错同步算法, 在不增加额外数据传输的条件下, 提供时钟同步服务。即使在有故障时, 也能达到所有的无故障节点具有基本一致的同步时钟。

(5) 为了实现容错功能, 具有分布式的网络管理冗余机制, 支持信息通道和控制模块的冗余。

(6) 协议具有较大灵活性, 在使用双交线和光纤的情况下, 都能保证高的数据传输速度。

(7) 使用 TDMA (Time Division Multiple Access) 总线访问机制。

(8) 系统的时间特性在设计中可以预先知道。

(9) 如果发生错误, 发送和接收方都可迅速检测到。

(10) 支持多种工作模式。

(11) 由于不需要位仲裁, 使用的网络传输媒体没有特殊电气限制。

(12) 信息格式中控制数据少, 数据传输效率高。

6.3.2 TTP/C 网络结构

如图 1.6-58 所示, 一个 TTP/C 网络由连接在两条通道上的电子控制模块 (节点) 构成, TTP/C 网络 and 这些节点构成的这个结构叫做一个簇 (Cluster)。



图 1.6-58 TTP/C 网络的结构

一个或几个电子控制模块结合在一起构成一个容错单位 (Fault Tolerant Unit, FTU)。即使在 FTU 的一些组成部分出现故障时, 它仍然能完成其功能: 总线访问方式为 TDMA。TDMA 的一个循环, 是分配给每一个最小可替换单位 (Smallest Replaceable Unit, SRU) 的一个时间片序列。在一个循环中, 一个电子控制单元最多可以发送一个信息。一个 TDMA 循环后, 开始下一个可能传输不同数据的 TDMA 循环。不同 TDMA 循环的数量决定了一个簇周期 (Cluster cycle) 的长度, 一个簇周期完成后, 按固定模式开始下一个簇周期。

6.3.3 电子控制单元的结构

在 TTP/C 网络中, 一个电子控制单元的基本结构如图 1.6-59 所示, 由一个主控制器、一个 TTP/C 协议控制器以及主控制器与车上的应用系统接口构成。主控制器执行应用系统软件, 协议控制器完成有关的通信控制。在 TTP/C 网络中, 在出现故障时, 电子控制单元就是一个最小的可替换单元 SRU。协议控制器与主控制器间的接口 (Communication Network Interface, CNI) 中, 有一块可以由主控制器和协议控制器随机访问的存储器和一个从协议控制器到主控制器的信号线; 这个存储器是主控制器和协议控制器的数据交换接口, 信号线传输以下两种信号:

(1) 全局同步时间信号 (Globally Synchronized Time)。

(2) 异步事件发生处理请求或状态信号。

协议控制器与总线之间的逻辑由总线保护器 (Bus Guardian) 和总线驱动器 (Bus Driver) 两部分构成。总线保护器的功能是, 当协议控制器定时系统出现故障时, 确保总线不受其影响。总线驱动器用来实现信号和电气特性的转换以及驱动功能。一个 TTP/C 模块, 要具有适合标准的 CNI, 还要有满足不同模块协议控制器间信息传送的逻辑接口标准。

6.3.4 TTP/C 系统的基本工作原理

TTP/C 网络的通信过程完全由协议控制器完成, 不需

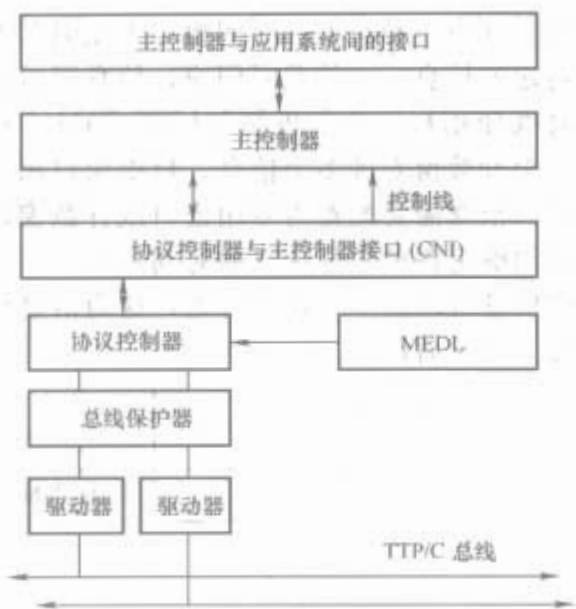


图 1.6-59 TTP/C 电子控制单元的结构

要主控制器的介入。所有的网络通信控制信息存放在协议控制器的信息描述表 MEDL 中。MEDL 的内容包括：

- (1) 对于每一个信息，MEDL 中存有它的发送时间和获取这个信息数据域中数据的 CNI 地址。
- (2) 特定数据应当到达（被接收到）的时间和接收后存放的 CNI 地址。
- (3) 信息传送协议的其他信息。

MEDI+中存放数据的项目还与簇周期长度有关。

在运行时，TTP/C 协议控制器按照一定精度把最小可替换单元 SRU 的本地时间同步，产生一个公共时间基准。每当这个公共时间定时到某一个 MEDL 中定义的事件时刻（发送或接收）时，协议控制器就执行对应的发送或接收操作。

6.3.5 TTP/C 协议介绍

TTP/C 的分层结构如图 1.6-60 所示，这是按照功能分层的结构。重新配置层（Reconfiguration, RC）和容错单位 FTU 层的接口称为 SRUCNI，它就是前面定义的 CNI。在 FTU 层和主控制器层间的接口称为 FTUCNI。



图 1.6-60 TTP/C 的分层结构

根据 MEDL 中的控制数据，TTP/C 数据链路层按照 MEDL 方式实现 SRU 间约信息帧传送。在 TTP/C 中，有两种 SRU：一种是实的 SRU，另一种是虚拟的 SRU。实的 SRU 具有属于自己的独立的时间片，而虚拟 SRU 是共享一个时间片的一组 SRU。一个申请了 TDMA 时间片的 RSU，被称为 RSU 会员（Member RSU）。在一个 TDMA 周期中，一个 SRU 会员在一个通道上发送一个信息帧。TTP/C 规定，一个 TDMA 周期中，最多可以有 64 个 SRU 时间片。不同的 SRU，发送信息的时间片可以是不同的，最大为 16 个字节，而同一个 SRU 时间片在每个 TDMA 周期是相同的。TTP/C 中每一个 TDMA 周期的格式都是相同的。

TTP/C 数据位编码方式采用改进的调频方式（Modi-

fied Frequency Modulation, MEM）。SRU 层根据 MEDL 中的控制信息，把接收的数据存到 CNI 中。SRU 层通过向簇中 SRU 会员发布会员信息的形式，实现一种隐含的信息接收应答方式。SRU 层为上层提供一种模式变化服务；在主控制器请求下，协议控制器进行模式转化操作。

重新配置层 RC 完成冷起动时 TTP/C 簇的初始化配置、系统动态配置以及修复的 SRU 恢复配置功能。在冷起动时，RC 层利用 SRU 层提供的模式变化服务配置 SRU 的工作模式。FTU 层完成 FTU 中的 SRU 冗余管理。FTU 是把两个或更多的 SRU 组合成一个基于冗余的有容错能力的单元。一般的 FTU 有 2~4 个 SRU，也可以通过在不同的 SRU 中执行相同的应用子程序实现 FTU。每一种 FTU 有不同的 FTU 会员（FTC Membership）服务方式和不同的 FTUCNI 结构。一个协议控制器一般不具备 FTU 层，但为主控制器相应软件提供 SRUCNI 接口。TTP/C 协议本身并没有具体的 FTU 定义，在进行应用系统设计时必须考虑这个问题。

在 TTP/C 系统中，只要有一定数量的无故障 SRU，系统就可以运行，一个 TTP/C 簇要最少有 4 个实的 SRU。设计时，一个簇可以包含比实际 SRU 多的 SRU 时间片。如果在一个簇中的有效 SRU 数少于 4 个，则只有无故障发生时能正常工作。

6.3.6 TTP/C 的故障类型

TTP/C 的故障类型包括内部物理故障、外部物理故障、TTP/C 控制器设计故障以及主控制器软件设计故障。

TTP/C 协议对任何 SRU 或总线中的组成部分的一个故障具有容错能力，即当只有一个故障时，不影响簇的任何功能和性能。基于 TTP/C 协议的系统，多故障的容错能力取决于具体系统的设计。在正常的工作条件下，TTP/C 支持大部分内部多层故障的容错设计。

如果一个外部的影响只造成一个 TTP/C 子系统的故障，则 TTP/C 系统可以抵御这样的外部干扰，保持正常的工作状态。

TTP/C 控制器以及簇的设计要保证正确性，即使 SRU 和簇是正确无故障的，主控制器的软件错误也可能引起这个 SRU 形成数据错误，但不影响簇中 SRU 的通信。

6.4 TTCAN

随着车上分布系统复杂性不断增加，对安全性要求更加严格，对网络通信的实时性、时间的可预测性等提出了更高的要求。基于事件触发通信的标准 CAN 协议已经不能适应这个发展趋势。由于标准 CAN 协议中，由事件触发通信过程，所以当有几个信息在同一时间发送时，会出现网络交通拥挤现象。这时，标准 CAN 协议基于位竞争的非破坏性仲裁机制能够保证这些信息以优先级的顺序发送，但会使一些信息的传送出现较大的延时，并且很难在设计时估计一个信息传送的延时特性。在实时应用系统中，如线控系统，整个网络的通信调度必须保证信息在任何网络流量状态下都能在一个已知的时间内传送，标准 CAN 很难满足这个要求。因此，Bosch 公司开发了支持时间触发的 CAN 协议，即 TTCAN（Time Triggered CAN）。TTCAN 通过在标准 CAN 之上增加了一个高层协议实现了时间触发通信功能。

6.4.1 TTCAN 的基本功能

TTCAN 是在标准 CAN 协议基础上建立的一个高层协议，在网络中它完成所有 CAN 节点通信调度的同步功能，

并提供一个网络全局时间同步机制；在此基础上实现时间触发的通信过程。在按全局时间同步后，TTCAN 网络中的节点可以在一个特定的时间窗口传送自己的信息，而不必再去竞争总线。除通信的同步过程外，TTCAN 节点按照标准 CAN 协议执行其他通信操作过程。其基本的同步控制过程是：网络的信息传送周期性的进行；由一个特定的节点周期性地向网络上发布一个参照时间值，各网络节点的活动按这个时间同步；在一个传送周期中，各个信息帧在各自的时间窗中传送。

TTCAN 已经成为 ISO 的一个标准，即 ISO 11898—4；它有两种实现全局时间同步的方式，即所谓方式 1（Level 1）和方式 2（Level 2）。在方式 1 中，CAN 的时间触发功能通过一个称为时间主节点（Time Master）的节点发布一个参照时间来实现同步的；在方式 2 中，TTCAN 还提供一个全局的系统时间基准，CAN 节点具有连续的时间调节功能，以保证与全局时间的一致。

6.4.2 参照时间信息及节点的定时

要实现时间触发的通信，必须首先实现网络中各节点活动的同步。这需要整个网络有一个公共的时间参照基准。在 TTCAN 中，周期性的传送调度，通过时间主节点周期性地向网络上发布一个特殊的 CAN 信息帧，即参照时间信息帧（Reference Message）来实现。网络中，这个信息帧的出现同时也标志着一个网络信息传送周期的开始，这个周期的时间长度由本地时钟产生。如图 1.6-61 所示，包括时间主节点在内，网络上所有节点在参照时间信息帧出现时就开始一个基于本地时钟的计时，这个时间称为周期内时间（Cycle Time）。每当在网络上有信息发送或接收时，信息帧的同步信号（Frame Synchronization）就把节点的本地时间（Local Time）锁存到寄存器 SyncMark 中。当一个正确的参照时间信息出现时，寄存器 SyncMark 的内容被送入寄存器 Ref-Mark 中，寄存器 RefMark 的内容就是参照时间信息出现时的本地时间。这个值与本地时间的当前值之差就得到周期内时间。在一个信息传送周期内，节点根据这个时间值，按照设计时的配置调度自己的发送接收活动。

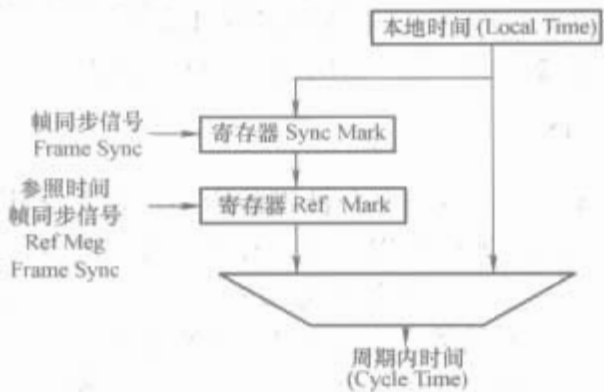


图 1.6-61 周期内时间的计算

TTCAN 方式 1，参照时间信息帧有一个字节的控制参数，其余的字节可以用于数据传送。TTCAN 方式 2，参照时间信息帧还包含时间主节点的全局时间值等 4 个字节控制数据，其余的字节亦可以用于数据传送。

6.4.3 基本周期和时间窗

如图 1.6-62 所示，两个参照时间信息帧之间的时间称为一个基本周期（Basic Cycle）。一个基本周期从一个参照时间信息帧开始，包含多个不重叠的时间窗。这些时间窗由一个时标（Time Mark）分隔，大小可以不同。网络中的节点在这些时间窗中传送信息，信息的格式与标准 CAN 相同。一个基本周期中，包括专用时间窗、仲裁时

间窗和自由时间窗三种类型的时间窗。专用时间窗只用于传送一个特定的信息；在仲裁时间窗，信息可以通过竞争仲裁获取总线使用权，竞争机制与标准 CAN 一样，设计时可以为一个仲裁窗安排多个信息；自由窗口用于系统扩展，它们可以根据需要配置为专用窗口或仲裁窗口。系统设计时，必须确定各种信息传送的时间窗口。一个基本周期中，一个信息可以在多个窗口传送，这为信息调度的调度提供了更大的灵活性。

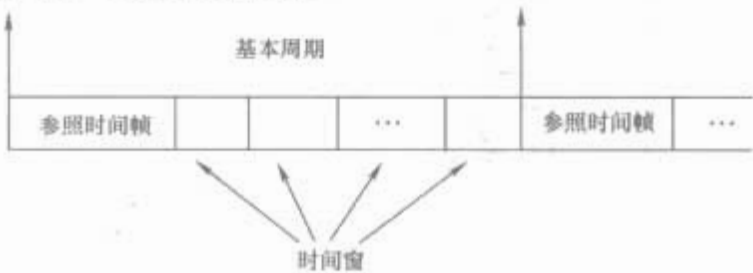


图 1.6-62 基本周期

6.4.4 系统信息阵

在 CAN 的应用系统中，经常包含多个控制循环和具有不同周期的信息传送，这些应用过程要求不同的信息传送模式。仅仅使用 TTCAN 基本周期方式，很难满足这些应用的要求。因此，TTCAN 允许使用多个基本周期构成系统信息阵（System Matrix）的方式提高信息调度的灵活性。所谓系统信息阵，就是由几个连续的基本周期构成的一个周期组。这一组周期结合在一起可以支持多种信息的传送模式。在一个信息阵中，基本周期的项序由其参照时间信息的帧决定。在一个 TTCAN 系统中，所有可能的信息都排入信息阵的某个时间窗中。一个 TTCAN 的节点不必知道整个信息阵的情况，它只要能够确认应在哪一个时间窗发送信息和是否需要接收的信息已经到达就可以了。节点通过时标识别时间窗，并根据设计要求完成在这个时间窗中的操作。如图 1.6-63 所示，为了识别一个时间窗，节点的协议控制器把网络上传来的时标与本地计算的周期内时间比较。当两者对应时，节点就可以判定这个时间窗在一个基本周期中的位置，由此确定这是哪一个时间窗，并执行相应的操作。

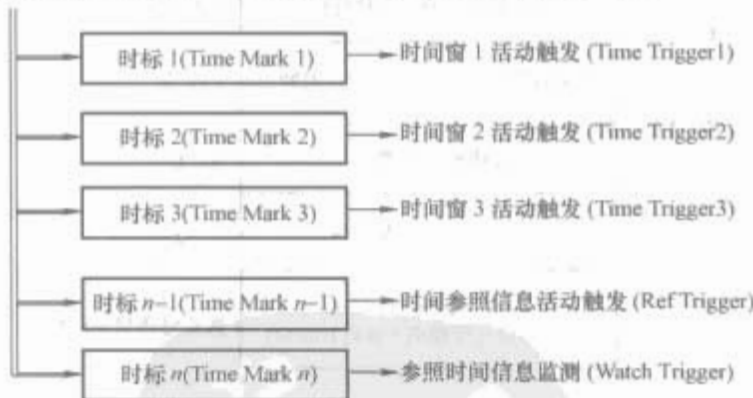


图 1.6-63 节点内活动的调度

除参照时间信息监测信号（Watch Trigger）外，其他的触发信号都将触发某个 CAN 节点一个信息的发送或接收操作。只有当参照时间信息没有按时到达时，才会使参照时间信息监测信号有效。它是参照时间信息丢失错误的标志，触发相应的错误处理过程。时间参照信息活动触发信号（Ref Trigger）由参照时间信息触发，它表示一个新的基本周期开始；这个信号将使节点内时间计数器复位，并重新开始计数。

6.4.5 TTCAN 网络时间单元

在 TTCAN 中，基本周期是其实现时间触发通信的基本时间基准。这个时间和 TTCAN 中的任何时间一样，是网络

时间单元 NTU (Network Time Unit) 的倍数。基本周期以 NTU 为单位。在 TTCAN 方式 1 中, NTU 基于 CAN 的标称位时间计算; 在 TTCAN 方式 2 中, 它基于一个物理的计时单位。在 TTCAN 方式 2 中, 为了在整个系统中建立 NTU, 每个节点的通信控制器的时钟振荡器必须与 NTU 建立对应关系。节点的时钟振荡器为一个分频器提供时基, 分频器经时间单元调节率 TUR (Time Unit Ratio) 调整后的输出为 NTU。NTU 经过一个计数器的输出得到节点本地时间和系统全局时间。

6.4.6 TTCAN 主时钟的容错处理

在 TTCAN 中, 时间主节点是实现网络时间同步最关键的部分。为了提高网络时间主节点的容错能力, TTCAN 采用了时间主节点冗余技术。在一个 TTCAN 网络中, 除了当前时间主节点外, 还可以设置几个不同级别的后备时间主节点作为后备全局时钟发生器。在后备时间主节点的 TTCAN 控制器复位后, 后备主时钟发生器检验总线上是否有信息传送以及是否有时间参照信息。如果没有, 它就发送一个带有它的标识符的参照时间信息。在 TTCAN 方式 2 中, 这个信息还包含这个节点的本地时间; 这个时间将作为网络的全局时间, 这个节点被看作网络时间主节点。网络上有多个后备时间主节点, 他们都检测网络上参照时间信息的状态, 当出现时间信息丢失时, 它们都按以上过程操作, 但其发出的参照时间信息优先级高的获得时间主节点的地位, 其他的节点不再发送时间参照信息, 并按照网络上的参照时间信息进行时间的同步。

当一个时间后备节点收到一个优先级低于它的参照时间信息时, 它首先与已有的参照时间同步, 然后通过在下一个主周期开始时发送自己的参照时间信息去竞争时间主节点地位, 通过上述机制, 当 TTCAN 网络出现活动主时钟故障时, 具有最高优先级的后备时间主节点, 将完成发送参照时间的功能; 同时保证在没有故障时, 系统的工作状态是稳定的。

6.4.7 与事件同步的初始化

在一些应用中, 长时间的严格的时间同步调度并非最佳的方式。对于一些事件却必须严格地保证其响应时间的要求, 这些事件并非一定周期性地出现。为了有效地支持这类应用, TTCAN 提供了灵活的参照时间调节功能。在一个应用过程中, 如果主时钟要中断周期性的调度, 并且系统设计时设定允许响应这类请求, 则在下一个基本周期后有一个空白区。这时其他节点将不会把这个参照时间信息的丢失识别为故障, 后备主节点也不会启动发送参照时间信息的过程。在主时间节点的应用过程中重新启动周期性调度, 发送与对应事件同步的参照时间信息, 并恢复周期性地发送参照时间信息。

7 SAE J1850

在 SAE 1994 年 2 月正式将 J1850 作为汽车网络 B 类标准之前, 它作为 SAE 的推荐协议已经被使用了 7 年。如今, J1850 协议广泛运用于汽车电子产品中作为诊断和数据共享。

SAE J1850 标准有两个基础部分构成: 一个是以单根总线连接的 10.4 kbit/s VPW (Variable Pulse Width) 方式, 另一种是以两根差分总线连接的 41.6 kbit/s PWM (Pulse Width Modulation) 方式。网络中最大的通信距离为 40m。

J1850 定义了两种寻址方式: 物理寻址和逻辑寻址。这两种寻址方式可以同时应用在网络中, 执行不同类型的任务, 因此可以在网络中任何地方使用这两种寻址方式。

J1850 的介质访问方式采用 CSMA/CR。在 J1850 总线上显性位的优先级比隐性位的优先级高。当总线被优先级高的节点占用时, 优先级低的节点停止发送, 直到总线空闲时, 再次重发, 避免了总线上信息的碰撞。J1850 是全帧比较方式, 即从帧起始位开始一位位进行比较直到帧信息结束为止。这种非破坏的冲突解决方法是 J1850 协议的核心。

SAE 在 J1850 标准中没有对错误进行严格的定义和分类。错误检测采用 CRC 校验方式, 当发送节点检测到自己发送的帧信息错误时, 它会自动中断发送过程。接收节点收到一个错误帧时, 这个帧信息将被忽略。J1850 应用层的设置主要是满足汽车中操作信息和故障诊断的需要。SAE 已经将操作信息作了进一步的扩充, 并把它定义在 J2178 中。诊断信息包括许可证的诊断、工业标准的诊断, 当然也可以是汽车生产厂家自己定义的诊断规则。

8 车上媒体网络 MOST

8.1 MOST 基本结构

MOST (Media Oriented Systems Transport) 是媒体信息传送的网络标准, 网络可以不需要额外的主控计算机系统, 结构灵活、性能可靠和易于扩展, 使用光纤作为物理层的传输介质, 可以连接视听设备、通信设备以及信息服务设备。MOST 网络支持“即插即用的方式”, 在网络上可以随时添加和去除设备。MOST 系统具有以下基本特征:

- (1) 保证低成本的前提下, 达到 24.8 Mbit/s 的数据传输速度。
- (2) 无论是否有主控计算机都可以工作。
- (3) 使用 POF (Plastic Optical Fiber) 优化信息传送质量。
- (4) 支持声音和压缩图像的实时处理。
- (5) 支持数据的同步和异步传输。
- (6) 发送/接收器嵌有虚拟网络管理系统。
- (7) 支持多种网络连接方式。
- (8) 提供了 MOST 设备标准。
- (9) 方便简洁的应用系统界面。

MOST 标准网络基于光纤的通信协议, 传输速率可大于 20M, MOST 网关需用支持多媒体的 32 位 MCU 实现, 并需要大量的 16 位单片机做每个子系统的控制。将 CAN 总线引入到车载网络 MOST 控制系统中, 可以解决具有多节点要求的分布式控制系统的底层通信, 并克服传统的串行通信方式所固有的通信速率低、通信抗干扰能力弱等缺点。本文将应用 CAN 建立 MOST 网络化的控制系统, 实现上位 PC 机对下位的 MOST 各个通信终端的监控以及同车上发动机电控及车身电子控制网络之间的是实时兼容控制, 广泛应用于分布式多节点的车上网络控制系统, 还可以进一步扩展以实现监控和自检过程控制。

MOST 节点设备的硬件系统设计主要包括以下几个方面: ① MOST 节点控制器; ② MOST 总线接口模块硬件设计。

连接到 MOST 上的任何应用层部分都是 MOST 设备。因为 MOST 设备是建立在 MOST 系统服务层上的, 它可以应用 MOST 网络提供的信息访问功能以及位流传送的同步频道和数据报文异步传送功能。它可以向系统申请用于实时数据传送的带宽, 同时还可以以报文形式访问网络和发送/接收控制数据。MOST 网络中, 在网络管理系统的控制下, 这些设备可以协同工作, 它们之间可以同时传送数据流、控制信息和

数据报文。所以，MOST 设备应当在以下方面适应相同的标准：①物理层接口；②通信机制；③网络管理，包括复位状态和响应、配置方式、频道分配以及故障检测与信令。

MOST 网络可以连接基于不同内部结构和内部实现技术的节点。它的拓扑结构可以是环形网或星形网或菊花链，网络上的设备分享不同的同步和异步数据传输通道，不同类型的数据具有不同的访问机制。一个 MOST 网络系统由以下三个方面决定：①MOST 连接机制；②MOST 系统服务；③MOST 设备。

MOST 网络起动时，为每一个网上设备分配一个地址；数据传输时，通过同步位流实现各节点的同步。

MOST 系统提供的服务功能包括：底层系统服务、基础层系统服务和应用系统接口。底层服务实现数据路由管理；MOST 网络服务（MOST Net Services）层完成基础层服务和应用系统接口功能，它提供网络管理以及数据的发送/接收的标准接口。以实现快速数据处理、高速可靠通信、强抗干扰性为目标，并在设计中严格遵守硬件设计的需求分析、充分考虑到硬件设计的技术要求，通过细致的需求分析而展开的。

8.2 MOST 信息帧

8.2.1 信息帧格式

在 MOST 网络系统中，从同步的角度看有两种节点：一种是发送帧格式的定时主节点（Timing Master）；另一种是从节点，它们与时钟主节点保持同步。如图 1.6-64 所示，MOST 网络传送信息时，以 16 帧为一个块；每个 MOST 帧又由 7 个部分构成，共 64 个字节 512 位；一帧中各部分的长度见表 1.6-72。

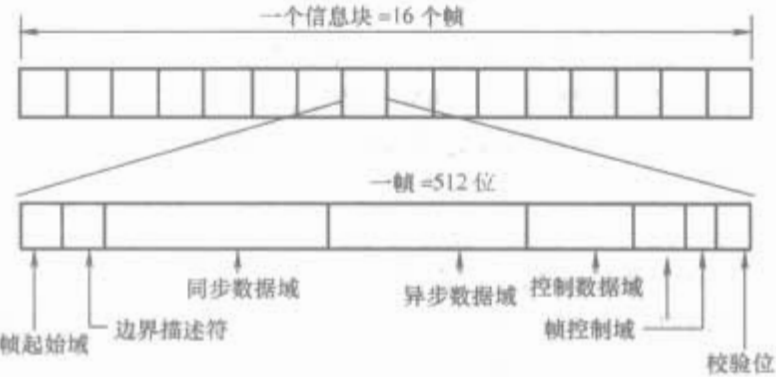


图 1.6-64 MOST 信息块和帧格式

表 1.6-72 MOST 信息帧结构

字节	位	功能
0	0~3	起始域
0	4~7	边界描述符（同步区计数）
1	8~15	数据字节 0
2~60	16~487	数据字节 1~数据字节 59
61	488~495	控制数据域字节 0
62	496~503	控制数据域字节 1
63	504~510	帧控制与状态
63	511	奇偶校验位

MOST 帧的起始域用于 MOST 核和应用功能块与位流的同步，网络上的节点根据这个信号进行时钟恢复。对于从节点，在复位、上电或丢失锁相（LOSS of Lock）时接收到第一个起始域，表示对输入位流的锁相已经完成；对于主节点，表示发送的位流与外部的时钟源同步。边界描述符用于调节同步传输和异步传输的频带宽度，它给出的编码是同步

区以 4 字节为单位的字节数；例如，为 0 时，表示同步区为 0 个字节；为 1 时，表示同步区为 4 字节；为 15 时，表示为 60 字节。数据字节域中余下的为异步传输区，它的值由时钟主节点管理。

8.2.2 数据类型

在 MOST 网络中，传输的信息有同步数据、异步数据和控制数据三种类型。这三种类型的数据分别由一个信息帧的同步数据域、异步数据域和控制数据域传送。从网络中传输的信息流角度看，包含同步数据、异步数据和控制数据三股信息的传送通道，所以又把一帧中的这三个域分别看作同步数据通道、异步数据通道和控制数据通道。这三个通道只是逻辑上的，它们共享一个物理通道。这些通道的频带宽度由它们在一帧中占的数据位数决定；一种数据占用的位数越多，单位时间传输的信息量越大，频带也就越宽。

同步数据域用于传送实时数据，数据的访问采用分时多路复用（Time Division Multiplexing, TDM）方式。一个通道的频宽可以由分配给这个逻辑通道的字节数调节（在一个帧中传送一个通道的数据字节多频带就宽），最大为 60 字节/帧，相当于 15 个 CD 质量的通道。典型的帧传输速度为 44 帧/s。

异步传输域用于传送大块的数据。异步数据以令牌环的方式访问。每个节点都可以访问这个通道，频带可以按 4 个字节的幅度调节。最大数据包的长度为 1014 字节，采用 CRC 校验。异步数据的格式见表 1.6-73。对于 48 字节的异步数据链路层方式，数据段为 48 个字节（字节 6~53）；另一种方式是数据长度为 1014 字节的格式，这时数据段范围为第 6~1019 字节，CRC 为第 1020~1023 字节。

表 1.6-73 异步数据的格式

字节	0	1~2	3	4~5	6~53 (6~1019)	54~57 (1020~1023)
功能	仲裁段	目的地址	长度 1（以 4 字节为单位）	源地址	数据段	CRC

控制数据域传输媒体控制和其他控制用数据。控制通道的协议采用载波监听多路复用（Carrier Sense Multiple Access, CSMA）访问方式。这个通道的频宽每秒可以提供 3000 个控制和状态信息，信息的接收和发送由发送/接收器芯片自动处理。控制通道状态的变化可以触发中断，以便于节点处理。控制通道的数据采用了 CRC 校验和接收应答机制。MOST 中有两种控制信息，“常规控制”（Normal）提供应用层的控制信息；“系统控制”（System）提供 MOST 系统相关操作控制信息。控制数据帧的格式见表 1.6-74。

表 1.6-74 控制数据帧的格式

字节	0~3	4~5	6~7	8~25	26~27	28~29	30~31
功能	仲裁段	目的地址	源地址	数据 (包括一个字节信息类型)	CRC	发送状态	(保留)

校验位用于错误检测和锁相环操作。

8.3 MOST 应用层通信协议

MOST 网络通信模型如图 1.6-65 所示。底层以 MOST 发送/接收控制器为核心，完成 ISO 的 OSI 模型中物理层和数据链路层的功能。第二层为网络服务层，完成 OSI 模型的网络层到表示层的功能。第三层为应用层。

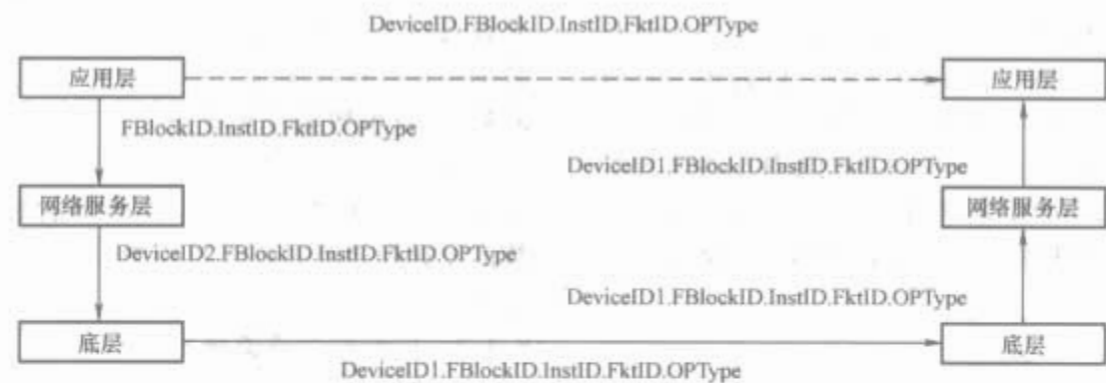


图 1.6-65 MOST 网络通信模型

MOST 应用层协议的基本结构为：

DeviceID, FBlockID, InstID, FktID, OPTYPE, Length

(Data)

其中各字段所表示的功能定义如下所述。

8.3.1 DeviceID

DeviceID 给出的是一个物理设备或一个物理设备组编码。这个字段长度为 16 位二进制数，在应用层中不必给予说明。当一个功能接收到一个协议请求时，DeviceID 给出的是发送这个请求的逻辑节点地址。在回复请求时，这个字段是接收节点的地址。在这种情况下，可以使用组地址或广播地址。如果发送方不知道接收方的地址，这个字段可以使用十六进制数 0FFFFH，这时网络服务功能将用对应的接收方地址码替代这个值。

8.3.2 FBlockID

FBlockID 字段是一个功能块的编码。每一个功能块都定义了一些不同的功能。协议标准给出了一些共同遵守的功能块编码规定，有一些是汽车生产厂以及相关总成或部件供应商共同遵守的专用功能块编码。在同一类系统中使用相同的编码，称为系统专用功能块码 (System Specific)；另一类专用功能块编码，称为厂家专用编码 (Supplier Specific)。另外，编码 0FFH 表示一个 MOST 设备中的所有功能块。当一个请求的 FBlockID 字段使用这个码时，被看作是一种广播型请求。这类请求被响应时，没有执行情况返回信息。表 1.6-75 是 MOST 标准中对 FBlockID 的规定。

表 1.6-75 FBlockID 字段编码

类型	FBlock ID 编码	名称	说明
管理类	00	网络服务 (NetServices)	网络任务通信用，应用层不能使用
	01	网络功能块 (NetBlock)	
	02	网络管理 (NetworkMaster)	
	03	连接管理 (ConnectionMaster)	
	04	电源管理 (PowerMaster)	
	05	车辆 (Vehicle)	
	06	诊断 (Diagnosis)	
	08	路由器 (Router)	
操作类	10	人机接口 (HMI)	
	11	语音识别 (Speech Recognition)	
	12	语音输出 (SpeechOutput)	
	13	语音数据库设备 (Speechdata-basedevice)	

续表

类型	FBlock ID 编码	名称	说明
音响功能	20	音响管理 (Audio Master)	
	21	音响 DSP (AudioDSP)	
	22	音响放大器 (Audio Amplifier)	
	23	耳机放大器 (Headphone Amplifier)	
	24	辅助输入 (AUXiliary Input)	
	26	麦克风输入 (Mmrophone Input)	
设备	30	磁带录音机 (Audio Tape Recorder)	
	31	唱片机 (Audio Disk Player)	
	32	ROM 播放器 (ROM Disk Player)	
	33	多媒体播放器 (Multimedia Disk Player)	
接收功能	34	多用途播放器 (Versatlle Disk-Player)	
	40	AM/FM 调节器 (AM/FM Tuner)	
	41	TMC 调节器 (TMC Tuner)	
	42	TV 调节器 (TVTuner)	
	43	DAB 调节器 (DABTuner)	
通信功能	44	卫星信号接收器 (Satellite Radio)	
	50	电话 (Telephone fix)	
	51	电话簿 (Phonebook)	
	52	导航系统 (Navlgatlon System)	
图像功能	60	显示 (Display)	
	61	摄像机 (Camera)	
	62	磁带录像机 (Video Tape Recorder)	
专用编码	0C0~0C7		系统专用
	0C8		保留
	0C9~0EF		系统专用
	0F0~0FB		生产商专用
	0FC		二级节点
	0FE		保留
	0FF		所有功能块

8.3.3 INSTLD

在一个系统中可能有多个相同的功能块。为了区分这些功能块，MOST 协议中引入了 InstID 字段，以标识一次操作的具体功能块。InstID 是一个八位二进制编码。当一个系统具有多个相同的功能块时，必须给这些功能块分配不同的 InstID 码，使 FBlockID、InstID 在整个系统中是唯一的。InstID 的默认值为 00H。0FFH 为一个设备中相同功能块的广播地址。

8.3.4 FktID

FktID 是一个功能的标识码。每一个 FktID 编码对应一个操作方法或一个属性。FktID 是一个 12 位二进制编码，所以每一个功能块中最多可以定义 4096 个操作方法或属性。按照功能性质不同，FktID 的地址空间分为六个区：

- (1) 管理功能区 (Coordination)：000H~1FFH。
- (2) 必备功能区 (Mandatory)：200H~3FFH。
- (3) 扩充功能区 (Extensions)：400H~9FFH。
- (4) 统一功能区 (Unique)：0A00H~0BFFH。
- (5) 系统专用功能区 (Proprietary/Systemspecific)：0C00H~0EFFH。
- (6) 生产商专用功能区 (Proprietary/Supplierspecific)：0F00H~0FFEh。

8.3.5 OPType

OPType 字段定义施加到 FktID 的操作。如表 1.6-76 所示，同一个 OPType 编码，对于属性类功能请求和操作方法，其请求含义不同。

表 1.6-76 OPType 编码			
OPType 类型	OPType 编码	属性类功能	方法类功能
命令类操作	0	设置参数值 (Set)	起动 (Start)
	1	读取参数值 (Get)	终止 (Abort)
	2	设置读取参数 (SetGet)	起动结果 (StartResult)
	3	增加 (Increment)	
	4	降低 (Decrement)	
	5	获取接口状态 (GetInterface)	获取接口状态 (GetInter {ace})
	6	保留	起动结果应答 (StartResultAck)
	7		终止应答 (AbortAck)
	8		起动应答 (StartAck)
状态报告	9		错误应答 (ErrorAck)
	A		处理应答 (ProcessingAck)
	B		处理操作 (Processing)
	C	状态 (Status)	结果 (Result)
	D		结果应答 (ResultAck)
	E	接口 (Interface)	接口 (Interface)
	F	出错 (Error)	出错 (Error)

8.4 MOST 网络服务层

MOST 网络服务层主要完成系统管理、发送/接收器控制服务、异步数据传输服务、同步通道分配和控制信息服务等功能。

MOST 系统管理完成系统的初始化、系统诊断以及电

源管理等功能。发送/接收器控制完成对发送/接收器工作状态设置以及监测功能，控制发送/接收器完成应用层要求的数据发送与接收操作。

8.4.1 异步数据传输服务

MOST 异步数据传输服务，控制异步数据包的发送和接收过程。通过写入发送/接收器的对应寄存器，设置异步数据发送和接收过程涉及的源节点地址、目的节点地址等控制参数。

8.4.2 同步数据通道服务

- 网络服务层完成的同步数据服务包括：
- (1) 为同步数据传输分配通道，建立这个数据通道与 MOST 发送/接收器源数据口间的连接路径。
 - (2) 释放被分配的同步数据通道。
 - (3) 根据一个功能请求，建立同步数据通道从 MOST 发送/接收器的网络输入端到源数据接口的连接。
 - (4) 解除同步数据通道与 MOST 发送/接收器源数据接口的连接。
 - (5) 查询具有某一句柄的同步数据通道。
 - (6) 界定同步数据通道和异步数据通道。

8.4.3 控制信息服务

在 MOST 网络服务的底层提供对发送/接收器寄存器读写操作的功能。通过控制通道，MOST 网络服务提供单数据包传输、分段传输和 MOST 高层协议传输方式三种类型的数据传输方式。单数据包传输可以一次传输最多 12 字节数据的报文。当要传送的命令或状态信息超过 12 字节长度时，可以采用分段传输方式，即通过多个报文传输这一组数据，每个报文包含不超过 12 字节的数据。单数据包传输和分段传输方式是 MOST 发送/接收器必备的控制数据传输方式。MOST 高层协议传输方式 (MOST High protocol) 支持数据流或大数据包的传送，它采用 TCP (Transport Control Protocol) 数据传输协议。

8.5 MOST 低层服务与发送/接收器

除了物理层的传输介质外，MOST 底层服务由发送/接收器完成。这些网络服务功能包括系统起动、系统关闭、故障检测与信令、通道分配和电源管理等。MOST 网络中，系统自动进行系统配置和起动的相关处理，支持动态的“热插拔” (Hot Plug-In) 和“即插即用” (Plugand Play)，系统自动检测和处理通道的分配以及配置的变化。

8.5.1 MOST 发送/接收器

MOST 发送/接收器 OS8104 是 Oasis Silicon Systems 公司生产的 MOST 网络通信控制器，它完成 MOST 网络数据传输以及网络控制的底层协议以及很多网络服务功能，在其基础上建立了 MOST 高层协议。OS8104 的基本特性包括：

- (1) 数据传输速度为 24.5Mbit/s。
- (2) 独立的 768kbit/s 的控制数据通道。
- (3) 灵活的带宽分配方式。
- (4) 支持光纤物理层。
- (5) 支持可远程访问的无微控制器节点 (独立工作方式)。
- (6) 自动多媒体通道分配。
- (7) 自动网络活动监测与唤醒功能。
- (8) 节点位置和网络延时检测。
- (9) 故障节点旁路和故障报警。
- (10) 支持多种 CD 和媒体播放器接口。
- (11) 支持各种格式数据的实时输入/输出方式。

- (12) 支持 1~8 速 IEC 958 口。
- (13) 通道采样频率为 3MHz。
- (14) 支持 VC/SPI 串行控制接口。
- (15) 一个 FIFO 8 位并行控制接口。
- (16) 低功耗和零功耗工作模式。
- (17) 5V 电源。
- (18) 44 脚 TQFP 封装。

如图 1.6-66 所示, OS8104 内部由网络接口、唤醒逻辑电源管理、源数据接口、时钟管理逻辑、I²C/SPI 接口以及 MOST 路由器构成。

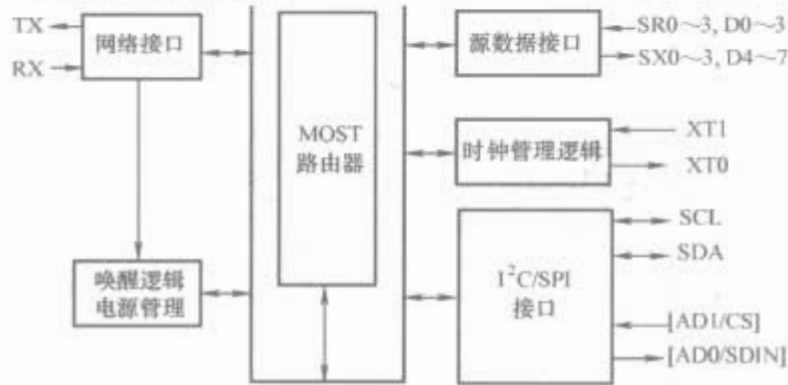


图 1.6-66 OS8104 内部结构

OS8104 通过网络接口与 MOST 网络连接, RX 为输入端, TX 为输出端, 它们可以直接连到总线驱动器上。OS8104 源数据接口是一个同步数据接口, 一般用于多媒体设备。数据源设备可以通过这个接口与 OS8104 连接, 通过网络发送或接收数据。电源管理逻辑可以控制 OS8104 工作在多种功耗状态。

8.5.2 OS8104 的网络管理功能

OS8104 内部嵌有网络管理逻辑。由于它包括通道分配、物理设备寻址、故障监测以及掉电和唤醒逻辑等功能, 使得 MOST 网络的应用非常方便。OS8104 还具有物理位置定位、网络延时检测和节点活动监测等网络管理功能。

8.5.2.1 数据通道分配

在 MOST 的一个帧中, 有 60 字节宽度的物理数据传输通道; 在一个分配请求中, 可以分配最多 8 字节的物理通道, 构成一个逻辑通道。由于所有的处理是基于位流传输的, 而且控制功能嵌入到发送/接收器中, 所以源数据的路由功能很容易实现。数据通道的分配由一个嵌入到发送接收器 OS8104 中的网络层通道分配算法完成。每个节点都有一个通道分配表, 它给出当前可以使用的逻辑通道信息。当节点要发送数据时, 可以查找空闲通道, 并向网络发出分配请求。当节点要接收数据, 可以通过通道分配表中的标时查找对应的通道并下载数据, 而不需要向源节点发送任何信息。通道的分配状态可以在运行中改变。

8.5.2.2 节点物理位置定位

在网络开始工作后, 一个节点相对于帧发生节点 (Frame Generator) 的位置是已知的, 这个位置决定了节点在网络中的物理地址。帧发生节点检测网络中的节点数并把这个信息传送给应用层。根据节点的位置可以实现动态的系统配置功能。

8.5.2.3 网络延时检测

在 MOST 网络中, 相对于帧发生节点 (又称为定时主节点, Timing-Master) 的延时不一定直接与节点的位置相关, 因为网络中有活动 (Active) 节点和被动 (Passive) 节点, 而只有活动节点引起数据的延时。发送/接收器的网络延时检测逻辑能给出准确的帧延时, 并且能完成时间补偿功

能。网络中的每个节点都知道网络的最大延迟时间。网络延时的补偿对于高保真音响、噪声消除、速度识别和多通道音响是非常重要的。

8.5.2.4 节点活动状态监控

为了实现通道分配、错误管理和电源管理等网络管理功能, 必须对节点的活动状态进行监测。发送/接收器中嵌入了节点活动状态监控机制。当检测到一个节点退出活动状态或进入休眠状态时, 从资源请求列表中删除这个节点, 原来它所占用的通道可以分配给其他节点。

8.5.3 OS8104 的电源管理功能

OS8104 支持零功耗模式和低功耗模式两种节电工作状态。当除了发送/接收器外的所有功能都停止时, 网络进入低功耗状态。置位定时主节点的唤醒位时, 这个节点恢复活动状态, 并向网络上发送一个唤醒信号。网络上的节点接收到唤醒信号时, 恢复活动状态。可以通过网络或控制信息把节点置为零功耗状态。在这个状态下, 节点不断查看网络的活动状态, 一旦发现有网络活动出现, 节点自动恢复活动状态。

8.5.4 MOST 网络服务应用程序接口 (NetServices API)

为了方便使用 OS8104 开发 MOST 网络, Oasis Silicon Systems 公司提供了 MOST 网络服务应用程序接口。Oasis Silicon Systems 公司用 ANSI C 语言编写了所有与 MOST 网络服务相关的程序库。通过这个应用程序接口, 用户可以使用这些程序。这些程序分为两类, 一类是所谓的基本服务程序 (Basic Services), 也称为第一层网络服务程序; 另一类为应用接口程序 (Applications Socket), 也称为第二层网络服务程序。基本服务程序完成诸如网络初始化、控制信息管理、源数据口控制、同步通道分配以及异步数据传输控制等功能。应用接口程序完成顶层操作和应用层的命令解释等功能。

第一层服务程序实际上完成的是 ISO 网络模型中网络层到会话层的功能, 第二层服务程序完成 ISO 网络模型中表示层和部分应用层的功能, 发送/接收器 OS8104 完成数据链路层和物理层的功能。

9 SAE J1939

SAE J1939 标准是美国汽车工程师协会 (SAE) 发布的以 CAN 总线为核心的测量网络串行通信和控制协议。它是按照 ISO 的开放式数据互联模型定义的七层基准参考模型制定的, 采用串行通信协议 CAN2.0B 作为网络协议的核心。其特点是: 使用所谓多路复用技术, 为车辆上各传感器、执行器和控制器提供建立在 CAN 总线基础上的标准化的高速网络连接, 在车辆电子装置之间实现高速数据共享, 有效减少电子线束的数量, 利于提高车辆电子控制系统的灵活性、可靠性、可维修性和保准化程度。目前, SAE J1939 标准已成为世界各大车辆部件制造商均支持的通信标准, 尤其在大客车、载货汽车、特种车辆和工程机械中得到广泛的应用。

J1939 是一种高速通信网络, 它被设计可以支持物理上分布在整个车辆的 ECU 之间的实时闭环控制功能。J1780/J1587 是一个早期版本, 广泛用于提供 ECU 之间包括诊断数据在内的简易信息交换的低速网络, J1939 能够执行 J1780/J1578 和控制系统支持的所有功能。任何一个应用都可能会用到这些网络的其中之一或两者。

J1939 使用 CAN 协议, 该协议允许在总线空闲时任何 ECU 向网络上发送一个报文。每个报文包含一个定义了报

文优先级、发送方和数据内容的标识符。由于仲裁过程，冲突被避免，这发生在标识符发送期间（使用了一个非破坏性逐位仲裁机制）。这允许高优先级的报文以较低的等待（延时）时间去获得，因为对于任何 ECU 在网络上都是等同访问，但是当多个 ECU 同时企图发送，最高优先级的报文将会获胜。

9.1 通信结构

9.1.1 报文格式和用法

J1939 提供了一个使用 29 位标识符（CAN 扩张帧）的

完整网络定义，如图 1.6-67 所示。J1939/21 允许 11 位标识符（CAN 标准帧）设备被用在同一个网络内部，定义所有报文是专有的，允许在没有干预的情况下两种设备类型的共存。11 位标识符不直接地是 J1939 的一部分，但是它被包含以确保它的用户可以在相同的网络上没有冲突地共存。J1939 不会提供关于 11 位标识符的进一步定义。29 位标识符中的前 3 位用于确定在仲裁过程中的报文优先级；000 有最高的优先级；较高优先级的报文用于高速控制报文中，例如从变速箱到发动机的转矩控制报文；较低的优先级将被用于非时间紧要的数据，例如发动机配置报文。

扩展 CAN 格式	S O F	11 位标识符											S R R	I D E	18 位标识符扩展																				R J R	
		优先级 P			R	D P	PDU 格式(PF) 6 位(高位)								S R R	I D E	PF		特定 PDRJ(PS) (目的地址、群扩展成专用)										译地址 SA							R J R
							2	1	8	7	6	5					4	3	2	1	8	7	6	5	4	3	2	1								
J1939 帧格式		3	2	1			8	7	6	5	4	3			2	1	8	7	6	5	4	3	2	1	8	7	6	5	4	3	2	1				
J1939 帧比特 位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33			
		28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18			17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0				

图 1.6-67 J1939 标识符

标识符（R）的下一位是保留位，对于发送报文该位应该设置为 0。这个默认值的设置允许 SAE 委员会在将来赋予它别的意思。

标识符中的下一个 9 位是数据页（DP）位和 PDU 格式（PF）场。PDU 代表协议数据单元（即报文格式）。DP 位被用作作为一个页选择器：页 0 包含目前定义的所有报文，页 1 为将来提供了附加扩展能力，在已经完成的页 0 之后进行分配。PF 场确定能够被发送的两种 PDU 格式其中之一。SRR 和 IDE 位被 CAN 总线完全地定义和控制，因此 J1939 不对其描述或修改。

标识符的下一个 8 位是 PDU 细节（PS），它们依赖于 PF 的值。如果 PF 值在 0~239 之间（PDU1），该 PS 场包含一个目的地址。如果 PF 场在 240~255 之间（PDU2），PS 场包含一个组扩展（GE）值。组扩展提供一组庞大的数值来识别可以被广播到网络上所有 ECU 的报文。

在 J1939 上的大多数报文都预期使用 PDU2 格式被广播。使用 PDU2 格式将数据发送到网络时无法指向一个具体的目的。当一个报文必须指向一个特定的 ECU 时，它必须已在 PDU1 格式数字范围内分配了一个参数组号（PGN），这样一个具体的目的地址可以被包含在报文的标识符内。这样的例子有变速器向发动机要求一个具体的转矩值或向减速器要求一个具体的转矩值。

总的来说，保留位、数据页、PF 和 PS 值定义了被发送的参数组（PG），这些 PG 有包括每个报文 8 字节数据场中的参数分配、变速器重复频率和优先级的明确定义。使用术语“参数组”是因为它们是一组特定的参数。参数组通过一个参数组号（PGN）来识别，它唯一地确定每个参数组。PGN 结构允许每页高达 8762 个不同的参数组被定义。

标识符的最后 8 位包含发送报文 ECU 的地址（源地址）。对于一个给定的网络，每个地址必须是唯一的（共 254 个可用）。两个不同的 ECU 不能同时使用一个地址。PGN 是独立于源地址的，这样 ECU 可以发送任何报文。

9.1.2 地址和名字

网络上的每个 ECU 将会至少有一个名字和一个地址与它相关联。可以举个例子，如一个发动机和发动机减速器存在于一个普通 ECU 中，在这里多个名字和多个地址可以在一个单独的电子单元中共存。ECU 地址为报文定义了一个具体的通信源或目的，名字包含了执行在那个地址的首要功能的标识并且增加了其功能性实例的一个指示，结果是拥有相同首要功能的多个 ECU 在相同的网络上共存。最多 254 个具有相同功能的 ECU 可以在网络上共存，每个 ECU 通过它们自己的地址和名字来标识。名字场见表 1.6-77。

表 1.6-77 名字场									
仲裁地 址能力	工业 领域	车辆系 统实例	车辆 系统	保 留	功 能	功能 实例	ECU 实例	制造商 编码	识别 编号
1 位	3 位	4 位	7 位	1 位	8 位	5 位	3 位	11 位	21 位

名字确定最初的车辆功能或者一个 ECU 所执行的功能，它唯一地标识每个 ECU，即使在网络上存在不止一个相同类型 ECU 的情况下。但是由于其 64 位的长度，一个名字在正常通信中的使用往往是不方便的。因此，一旦网络被完全初始化，每个 ECU 利用一个 8 位地址作为其源标识符或“操作”去提供唯一访问网络上一个给定 ECU 的路径。例如，一个发动机被分配为地址 0，但是如果出现第二个发动机，它需要一个单独的、唯一的地址（例如 1）和实例。接受具体目命令的 ECU 可能需要多个地址。这允许区别哪一个动作将要发生。例如，如果变速箱向发动机（地址 0）请求一个具体的转矩值，这一定是和向发送机闸（减速器）（地址 15）请求转矩值是有区别的。正如从这个例子中所看到的，网络上一个单独的 ECU 可能会有多个地址，并且每个地址都会与一个名字相关联。为了方便为网络上每个 ECU 确定地址的初始化过程，常用的设备有优选的地址，它们由委员会来分配。使用优选地址减小了多个设备声明相同地址的可能性。

一般来说，大多数 ECU 在上电时刻都会使用优选地址。

上电之后用于分配地址的一个特定步骤被用来解决可能发生的任何冲突。每个 ECU 必须有能力宣称哪一个地址它打算使用,这是地址声明特性,它有两种选择是可用的:

(1) 上电和只要复位,ECU 必须发送一个地址声明报文去声称一个报文。当一个 ECU 发送地址声明报文,所有的 ECU 记录或将这个最新声明的报文与它自己的地址表相比较。并不是所有的 ECU 都需要维持这样的一个表,但是至少能够将它们自己的地址与最新声明的地址相比较。如果多个 ECU 声明了相同的地址,NAME 值最小的使用这个地址,其他的必须声明一个不同的地址或停止向网络上发送。

(2) 一个 ECU 可能会为地址声明报文发送一个请求,目的是确定其他 ECU 声明的地址。当一个 ECU 发送了对于声明地址的请求,所有被请求的 ECU 会发送它们的地址声明报文。这将允许过渡 ECU (工具,拖车等)或迟上电 ECU 获得当前地址表,这样一个可用的地址可被找到并且被声明,或者确定哪个 ECU 在当前的网络上。这个方案允许那些需要自配置地址的 ECU 的选择,但并不把它作为所有 ECU 的一个需求。自配置寻址是可选择的,推荐那些可能会遇到地址冲突的 ECU 支持这项功能。

当一个地址冲突被检测到,下面的 4 个选项是可用的,这取决于有关 ECU 的能力:

(1) 自配置的 ECU。一个自配置 ECU 有动态计算并声明一个未使用地址的能力。大多数服务工具和网桥有这个功能。

(2) 命令配置的 ECU。一个网络互联 ECU,例如一个网桥、或一个服务工具,可能会命令另一个 ECU 去使用一个给定地址。拥有未声明地址的 ECU 则会发布一个地址声明报文来承认接受这个新的命令地址。ECU 可能会被命令接受一个新地址,即使它已经声明了一个有效的地址。

(3) 服务配置的 ECU。可被服务人员更改的 ECU,常常通过 DIP 开关或服务工具。当“命令地址”报文被使用,它的选择与命令配置的不同在于它需要一个服务工具并且经常会使用专利技术。

(4) 不可配置的 ECU。那些既不是自配置也不是可重编程的 ECU,如果声明有效地址失败,那么它将会停止发送。

9.1.3 通信方式

在 J1939 中存在 3 种主要的通信方式。这 3 种通信方式是:①有明确目的地的通信方式,使用 PDU1 (PF 值 0~239) (包括全局目的地址 255 的使用);②广播通信方式使用 PDU2 (PF 值 240~255);③既采用 PDU1 也采用 PDU2 格式的专有通信方式。

每种通信方式都有一个适当的应用。当报文必须被指向一个或另一个明确目的地而不是两者时,明确目的地参数组号是需要的。J1939 当前定义了一个转矩控制报文,它可能被发送到一个发动机或减速器。在发送机不止一个的情况下,这个报文必须只被发送到期望的发动机,一个明确目的地参数组号是需要的并且已经被分配。

广播通信方式的应用场合包括:①报文发送从一个单个或多个源到一个单个目的;②报文发送从一个单个或多个源到多个目的。

当一个报文必须被发送到一个或零个目的地而不是两个时,广播通信方式是不可以被使用的。

J1939 中的第 3 中通信方式——专有通信方式通过两种专有参数组号的使用被提供。一个参数组号已经被分配给广播专有通信,一个参数组号已经分配给有明确目的地的专有

通信。这考虑到了两个功能:第一,明确的源可以在一个 PDU2 类型格式(广播)中发送它的专有报文;第二,它允许服务工具必须将它的通信指向一个具体的目的地而不是一个可能的 ECU 组的情形。例如,这会在发动机使用不止一个控制器但是服务工具必须可以执行标定/重编程而且所有的 ECU 都连接到相同网络的情况下出现。在这种情况下,专有协议需要明确目的地。应注意,目的 ECU 必须有能力适当地解释专有数据。

专有通信在以下 2 种情况中是有用的:①在那些没有必要完成标准化通信的场合;②在那些需要传送专有信息的场合。

9.1.4 发送报文

除图 1.6-69 中所示的 29 位标识符之外,一个 CAN 数据帧包括一个 6 位的控制场、一个典型 8 字节的数据场,并且以 CRC、ACK 和 EOF 场终止。为发送一个特定的数据项,一个报文必须通过恰当地填充这些场来构造。这可通过首先参考适用的 J1939 文档来完成。这个过程将会定义使用的参数组号(PGN)、报文更新(传输)速率和默认的优先级。因为多个数据项典型地打包在一个报文中,也将会定义数据场的格式。注意到,对于一个给定的参数,当 ECU 没有可用的数据时,它设置这些位为“不可用”,这样接收器知道数据没有被提供。

9.1.5 接收报文

有多种不同的技术(和电子 IC)可用于从网络上捕获选择的报文。然而对于接收到的报文,可以进行一些一般的观察。

(1) 如果它是一个有明确目的的请求或命令,ECU 必须确定在它自己和进入报文的目的地之间是否有一个地址符合。如果有,它必须处理这个报文并且提供某种形式的应答。

(2) 如果报文是一个全局的请求,每个 ECU,甚至发起者,必须处理它。并且,如果数据是可用的,还要做出响应。

(3) 如果一个报文是广播的,每个 ECU 必须确定它是否是相关的。

9.1.6 ECU 设计

J1939/11 的当前数据速率是 250kbit/s (400μs/bit)。一个典型的报文包含 8 个数据字节 128 位长(除用于位填充的位之外),它接近 0.5ms。最短的报文是 64 位长,这意味着每 250μs 就会出现一个新报文。即使并不是每个报文都是相关的,并且总线负荷也不太可能超过 50%,但是接收处理器仍必须有能力处理(或缓冲)多个背对背报文。对于转储这将会需要一些 RAM 空间和处理器时间。这个需求便是每个报文都不应该丢失,因为 ECU 的硬件或软件设计有局限性。

9.1.7 网络拓扑

J1939/01 网络定义一个系统,包含一个或多个通过网络互联 ECU 连接的网段。每个 J1939 网段由一个单独的、直线的、屏蔽双绞线组成,它围绕着车辆的一个部分直到每个 ECU。一个短的分支线被允许将这个总线连接到每个 ECU。由于不需要直接接近每个 ECU,这简化了主干总线线路的布线。直线总线 250kbit/s 的数据速率是必须的,目的是减小电气信号的反射。在总线每个端点的终端电阻也可以减小反射。为了支持一个牵引车拉动一个或多个拖车和频繁的移动,以及附加的新拖车,一个单独的 J1939 网段(子网)在牵引车和每个拖车内被使用。

这样，J1939 网络可能由多个网段组成，在它们之间有一个网络互联 ECU（网桥）。这些网段不必须直接互相兼容，它们可以在不同的数据速率或使用不同的物理层介质的情况下运行。例如，一个网桥提供网段之间的电气隔离，提供连接到它的子网的初始化，并且可以提供报文过滤来阻止在该子网上没有必要的报文通信量。如果暴露在牵引车和拖车之间的线路有总线失败情况出现，在牵引车上的主 J1939 子网仍继续起作用。

9.2 预分配值

9.2.1 参数组号

参数组号被明确地分配为使用 PDU1 格式或 PDU2 格式。如果一旦被分配到了一种格式，那么对于那个参数组其他的 PDU 类型是不可用的。一个参数组号的分配应该在谨记以下特性的情况下被完成：优先权、更新速率、到其他 ECU 的数据包的重要性和与参数组相关数据的长度。

由一个单独生产商构造的 ECU 之间的大多数通信并不需要标准化。通常来讲，它们所交换的信息对于网络上的其他 ECU 是没有用途的。在这种情况下，专有参数组可以被使用。标准化通信的使用是首选的并且只要可行就应该使用，然而专有选项仅作为解决特殊问题和情况的一种方法。

如果专有信息被交换，或者交换的信息并不是一般意义的，这时专有方式应该被使用。如果信息是一般意义的并且不需要将报文指向一个特殊的 ECU，一个利用 PDU2 广播格式的参数组号应该被寻求。最后，如果信息是一般意义的但需要指向一个或另一个 ECU，这时明确目的寻址是需要的，并且一个 PDU1 格式参数组号应该被寻求。专有和 PDU1 通信方式应该被仔细地考虑和慎重地使用。

9.2.2 数据场分组

最小化基于 CAN 系统的报文开销需要充分地利用报文的数据场。除了恰好的时间紧要报文情况之外，参数应该被分组填充到 8 字节的数据场。根据这个原则为将来的分配保存一些 PNG，并且当所有的数据字节都被相同的地址识别和发自相同的地址时考虑到最小的网络负荷。

参数分组方法如下：

- (1) 通过普通的子系统（ECU 可能量度和发送数据）。
- (2) 以相同的更新速率（最小化不必要的开销）。
- (3) 通过功能（油，冷冻剂，燃料等）。

应该清楚的是，这些只是准则，在大多数情况中当参数被分组到一起，它们将终止违反以上的一个或多个规则。因为 J1939 中定义的所有参数在不可用时有一项用于识别的技术，所以在一个参数组中的所有参数都来自相同的 ECU 并不是关键的。如果一个新的参数被定义，并且在一个现有的参数组中有空闲的字节或位，这时可以把它添加到那里。当更新速率很快时，确保一个参数组在定义另一个 PG 之前尽可能地被完全利用是非常理想的（例如，使用全部的 8 个字节），并且更可取的是所有的参数都来自一个特定的 ECU。

对于较慢更新速率的数据，参数组中的所有参数是否来自相同的 ECU 并不是那么重要。即使参数都来自一个 ECU 是理想的，但是 J1939 的目的是提供一种用于数据交换但不指定是哪个 ECU 发送的何种数据的方法。

9.2.3 名字系统和功能

功能是一种通过一个或多个 ECU 服务的部件或部件组的能力。每个 ECU 的功能由该 ECU 名字域中的一个 8 位场来识别。由于多个 ECU 可能具有相同的功能，名字域中的

功能实例场用来在它们之间做出区别。由于不同的行业组或车辆系统，相同的功能值（最高仅 128）可能表示不同的含义，因此功能（最高仅 128）识别取决于行业组和车辆系统。

车辆系统是一个车辆或一个模拟部件的一个子部件，它包括一个或多个 J1939 网段，并且可能与整个车辆连接或分离。一个车辆系统可能由一个或多个功能组成，它的 ECU 被连接到该车辆系统的 J1939 网段。典型的公路车辆系统是一个牵引车或拖车。因为车辆系统的定义在不同的行业之间存在差异，系统定义取决于行业组，见图 1.6-68。

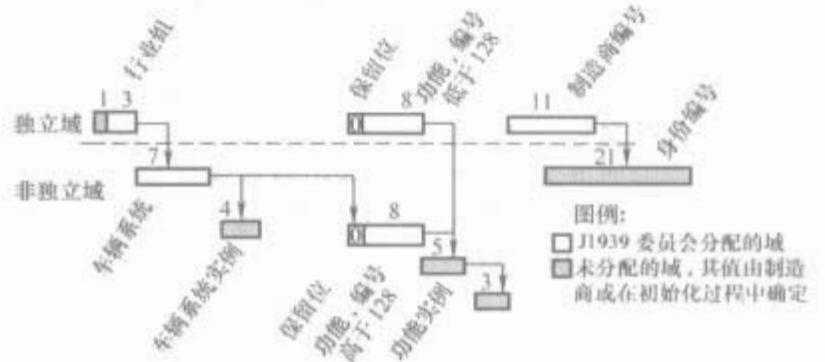


图 1.6-68 名字域中的从属关系

网络上的一个单独 ECU 可能结合了多个功能，并且对于每个支持的功能可以选择声明一个单独的地址。

9.2.4 行业组

为了让多个行业采用 J1939，利用行业组代码来识别与 ECU 相关的行业。代码 0 是一类特殊的行业组，它标识了对所有行业通用的首选地址和名字，可用于多个行业。可能用在不止一个工业应用中的任何 ECU，例如柴油机，它应该有这个全局组内的名字和首选地址，去考虑是否是这种情形是那些新定义请求的责任。为了避免将名字或地址值用光，要求全局值仅在真正可适用时才使用，如果一个 ECU 仅存在于一组中，例如农业器具，那么将该定义加入到可用的组比使用一个全局值更可取。

9.2.5 制造商代码

如 J1939/81 中所定义，名字按惯例包括一个制造商代码，允许一个独特的 ID 号成为整个名字的一部分。这个 ID 号由制造商分配，并且如果需要，它可以是一个独立 ECU 的序号。为了使 ID 号对于一个特定的制造商是唯一的，所有使用 J1939 的制造商都被分配一个代码。一个制造商允许拥有多个代码，以适应诸如多个部门或主要产品线的场合。如果每个产品各自有独特的制造商编码时，会很快耗尽可用的编码范围。在名称的 ID 号域中有 21 位是可用的，如果需要的话允许制造商对每个产品分别指定。

9.2.6 首选地址

在一个特定系统中的地址数量不能超过 254（设备不能声明空地址或全局地址）。在一个 J1939 网络上运行的大多数 ECU 会有一个分配的首选地址，它可能会被 ECU 所使用。如果 ECU 的首选地址已经被声明或者正在被网络上的另一个 ECU 所使用，那么冲突的解决是通过一定的程序来完成的，还会有一些附加的约束或程序定义在相应的文档中。例如，公路拖车网桥和设备有与 Con-Ag 系统不同的地址声明限制。然而，如果备选方案没有被定义，它应该试图声明一个在 128~247 范围内的地址，从 128 开始。单独保留的首选地址分配从 0 开始，并且以线性的方式分配，如下：

0~127，保留给行业组 0 中的大多数常规 ECU——

全局。

128~247, 保留给行业特定分配。

248~253, 保留给特殊的 ECU。

254, 空地址。

255, 全局地址。

9.2.7 可疑参数号 (SPN)

可疑参数号 (SPN) 是一个 19 位号码, 它用来识别一个特殊的元素、部件或与一个 ECU 相关的参数。这种能力对于诊断、允许一个已经发现与特殊部件相关的故障的 ECU 是尤其有用的, 例如一个传感器, 通过发送一个故障报文识别发生故障的部件。第一个 511SPN 是保留的, 如果可能的话, 它会被分配为与 J1587 的参数标识符 (PID) 完全相同的号码。例如, J1587 PID 91 是“油门踏板位置百分比”, 并且一个油门踏板位置参数故障会通过使用 SPN91 在 J1939 中被报告。下面的所有 SPN 都会以它们被接收的方式被按次序分配。

由于大量的 SPN 最终会被分配并且它们的分配按请求的次序进行, 那么对于一个有兴趣找出一个特殊部件的 SPN 值的人, 仅通过观察表格的方式是非常困难的。为了便于证实, 那个新的 SPN 请求并不是现有分配的复制品, 委员会把这个表格以一个 MS Excel 电子数据表格的形式保留。它允许的分类基于 SPN 号码、名字、描述、属性 (执行器、压力、温度、螺线管等)、J1587 属性 (MID, PID, SID)、J1939 文档段落、源名称和源地址。这对于那些发展中的 J1939 应用或期望请求一个新的 SPN 分配去获得一个新的版本是非常理想的, 这样它们可以进行各种分类和数据的查找。在发行的时候, SAE 还没有确定出如果将这些数据做到对于 J1939 用户是可用的、谁不是委员会参与者。

10 车载诊断协议——KWP2000

在汽车故障诊断领域, 针对诊断设备和汽车 ECU 之间的数据交换, 各大汽车公司几乎都制定了相关的标准和协议。其中, 欧洲汽车领域广泛使用的一种车载诊断协议标准是 KWP2000 (Key Word Protocol 2000)。该协议实现了一套完整的车载诊断服务, 并且满足 E-OB D (European On Board Diagnose) 标准。ISO 14230-1 规定了 KWP2000 协议的物理层规范 (K 线、L 线), 它在 ISO 9141-2 的基础上, 把数据交换系统扩展到了 24V 电压系统。ISO 14230-2 规定了 KWP2000 的数据链路层协议, 包括报文结构、初始化过程、通信连接管理、定时参数和错误处理等内容。ISO 14230-3 规定了应用层的服务规范, 包括诊断管理功能组、数据传输功能组、诊断信息传输功能组、输入/输出控制功能组、远程起动 ECU 例程功能组、数据上载/下载功能组和扩展功能组。

10.1 物理层

10.1.1 系统配置

支持该协议的车辆 ECU 应该支持单线 (K 线) 或者双线 (K 线和 L 线) 的通信连接。K 线是一个双向线, 它在初始化期间用来传输地址, 该信息传输过后, K 线用于所有其他的诊断仪和车辆 ECU 之间的双向诊断通信。L 线是单向线, 它只在初始化期间传输地址信息, 其他时间它应该保持在逻辑“1”状态。系统配置如图 1.6-69 所示。

10.1.2 信号和通信规范

10.1.2.1 信号

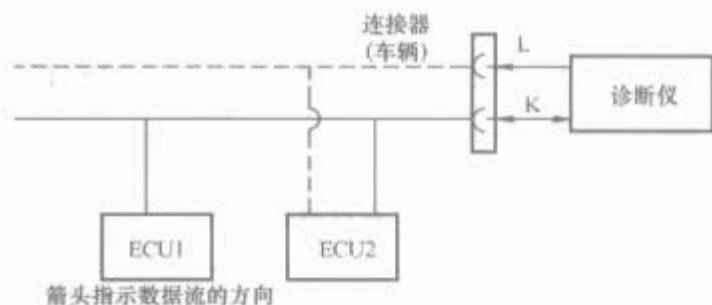


图 1.6-69 系统配置

在符合 SAE J1962 连接器的车辆上, 所有的度量都应该以该连接器的信号地和蓄电池电源管脚为基准。在没有地和电源管脚的车辆上, 应该以蓄电池极柱为基准。

为了保证串行通信的正常运行, ECU 和诊断仪都应该准确地确定它们各自的逻辑状态, 如图 1.6-70 所示。

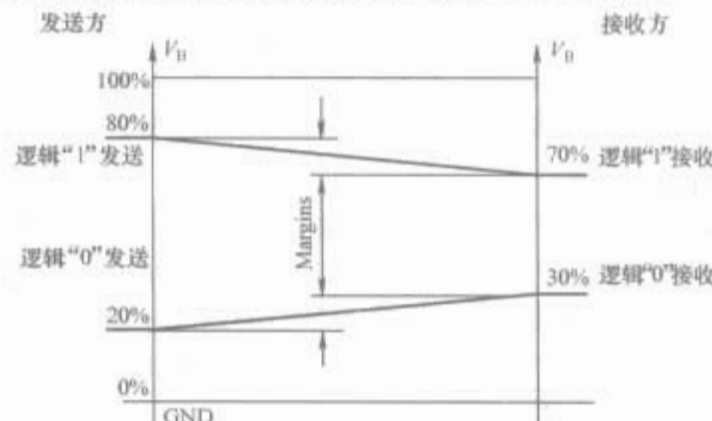


图 1.6-70 信号电压电平

10.1.2.2 通信规范

通信示意图如图 1.6-71 所示。



图 1.6-71 通信示意图

C_{ECU} 和 C_{OBW} 值的选定需根据以下原则进行:
 $C_{ECU} + C_{OBW} \leq 7.2nF$ 和 $C_{TE} \leq 2nF$ (标称 12V 电源)
 $(C_{ECU} + C_{OBW} \leq 5.0nF$ 和 $C_{TE} \leq 2nF)$ (24V 车辆电池电压系统)

这些值来源于电路阻抗和波特率容差、允许的斜坡时间和开关门限, 并且假定最大通信速率在 10.4kbit/s。

10.2 数据链路层

10.2.1 作用范围

这部分仅规定数据链路层, 包括在一个串行数据链路 (物理层) 中实现服务必需的所有定义。也包括通信/会话所需要的一些通信服务及错误处理方面的描述。

这里并不对实现诊断服务的需求进行规定。物理层将被视为一个多用户总线, 这样仲裁或总线管理将是必需的。

10.2.2 物理拓扑

KWP2000 是一个总线概念。图 1.6-72 所示为该串行链路的一般形式。

10.2.3 报文结构

报文结构由 3 个部分组成: 头部、数据字节和校验和, 如图 1.6-73 所示。

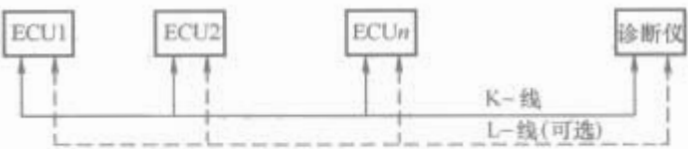


图 1.6-72 串行链路形式

头部					数据字节	校验和
Fmt	Tgt ^①	Src ^①	Len ^①	SId ^②	... Data ^② ...	CS
最多 4 个字节					最多 255 个字节	1 个字节

图 1.6-73 报文结构

Fmt—格式字节；Tgt—目标地址字节；Src—源地址字节；Len—长度字节；SId—服务标志符字节；CS—校验和字节
①可选并且由格式字节决定；②服务标志和数据字节部分

10.2.3.1 头部

头部最多包含 4 个字节（格式字节、目标地址字节、源地址字节和长度字节）。格式字节如图 1.6-74 所示，它包含了报文形式的相关信息，源地址和目的地址字节是可选择的，它们用在多个节点连接的场合中。可选择的长度字节允许报文长度最大 255 字节。

A1	A0	L5	L4	L3	L2	L1	L0
----	----	----	----	----	----	----	----

图 1.6-74 格式字节

格式字节包含 6 位（L0~L5）的长度信息和 2 位（A1 和 A0）的地址模式信息：

- (1) A1 和 A0 规定报文所使用头部的格式，见表 1.6-78。
- (2) L0~L5 定义报文的长度，从数据场开始（包括服务标志符字节）到校验和字节（不包括）。
- (3) 如果 L0~L5=0，这时附加的长度字节将被包括在内。

表 1.6-78 头部格式

A1	A0	模式
0	0	无地址信息
0	1	例外模式 (CARB)
1	0	有地址信息，物理地址
1	1	有地址信息，功能地址

10.2.3.2 目标地址字节

它是报文的目标地址，并且始终与源地址字节一起使用。它可能是一个物理地址或者一个功能地址。目标地址字节是可选择的，并且只在多节点总线拓扑上是必需的，对于在只有两个节点连接的情况中它是可以省略的。

10.2.3.3 源地址字节

它是发送设备的地址，而且必须是一个物理地址。源地址字节也是可选择的，并且只在多节点总线拓扑上是必需的，对于在只有两个节点连接的情况中它是可以省略的。

10.2.3.4 长度字节

如果头部字节中的长度（L0~L5）设置为 0，那么则允

许用户传输数据场长度超过 63 字节的报文。该字节定义从数据场开始（包括服务标志符字节）到校验和字节（不包括）的长度。在这种情况下，数据长度可在 1~255 个字节之间。如果报文数据场长度小于 64 个字节，那么将会有两种情况可选择：长度包含在格式字节中，或包含在附加长度字节中。

10.2.3.5 数据字节

数据场可能包含高达 63 个或 255 个字节的信息，这取决于长度信息的使用。数据场的第一个字节是服务标志符，跟随它的可能是参数或数据（由服务而定）。

10.2.3.6 校验和字节

校验和字节位于报文块的结尾，它被定义为报文中所有字节（不包括校验和）的 8 位和序列。

10.2.4 定时

在正常的运行期间，报文流定时如图 1.6-75 所示，定时参数见表 1.6-79。



图 1.6-75 报文流定时

表 1.6-79 定时参数

数值	描述
P1	ECU 响应字节间时间
P2	诊断仪请求和 ECU 响应之间或两个 ECU 响应之间的时间
P3	ECU 响应结束和诊断仪请求开始之间的时间
P4	诊断仪请求字节间时间

- 共有两组默认的定时参数：
- (1) 一组用来进行标准的功能和物理寻址通信。
 - (2) 一组用来进行物理寻址的快速通信。
- 定时参数可以通过通信服务中的“寻址定时参数服务”来改变。

10.2.5 通信服务

有一些服务用来建立和维护通信，但是由于它们不出现在应用层而不属于诊断服务，它们是：开始通信服务、停止通信服务、寻址定时参数服务和发送数据服务。

一般来讲，这些服务只有开始通信服务是必须实现的。开始通信服务和寻址定时参数服务被用来起动一个诊断通信。为了执行任何一个诊断服务，通信必须被初始化并且通信参数需要适合于期望的诊断模式。通信服务流程如图 1.6-76 所示。

10.2.5.1 开始通信服务

该 KWP2000 通信层服务的目的是初始化通信链路以交换诊断数据，它可由表 1.6-80 来描述。

表 1.6-80 开始通信

开始通信请求	M
初始化模式标识符	M
目标初始化地址	M
源初始化地址	C
开始通信正确应答	M
关键字	M



图 1.6-76 通信服务流程图

初始化的方式由初始化模式标识符 (Initialisation Mode Identifier) 决定，这个参数的值可以是CARB初始化、5-

Baud 初始化或快速初始化。

(1) 通过任何方式的初始化完成之后，ECU 都应该在相同的状态：

- 1) 所有的通信参数都应该根据关键字节（属于 ECU 的肯定响应参数，解释见后续部分）设置在默认值。
- 2) 经过 P3 的一段时间间隔，ECU 等待来自诊断仪的第一个请求。
- 3) ECU 处于默认的诊断模式。

(2) 下面的几个事实对于所有的初始化模式都是通用的：

- 1) 在任何活动之前都应该有一段总线空闲时间。
- 2) 然后诊断仪发送一个初始化模式。
- 3) 建立通信所必需的所有信息都包含在 ECU 随后的响应中。

关键字节 (Key Bytes) 是 ECU 用来通知诊断仪它所支持的头部、定时和长度信息的部分，它在建立通信期间通过 ECU 响应发送给诊断仪。关键字节的具体格式和解释见图 1.6-77 和表 1.6-81。

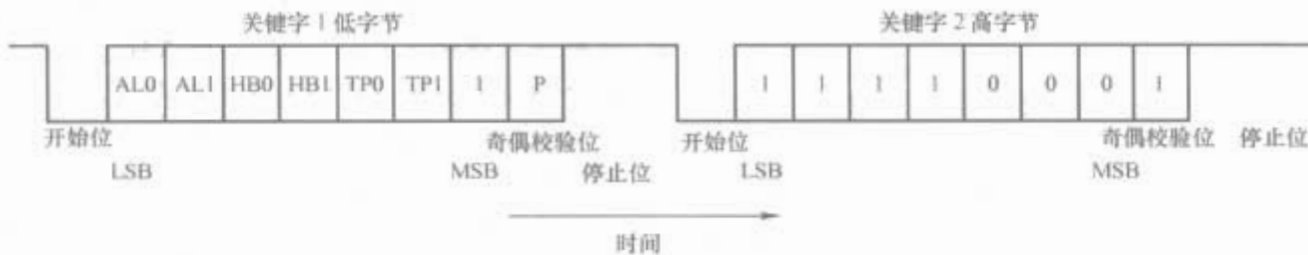


图 1.6-77 关键字节

表 1.6-81 关键字节含义		
关键字节	=0	=1
AL0	在格式化字节中不支持长度信息	在格式化字节中支持长度信息
AL1	不支持附加长度字节	支持附加长度字节
HB0	不支持 1 字节报头	支持 1 字节报头
HB1	报头中不支持目标/源地址	报头中不支持目标/源地址
TP0*)	标准时间参数设置	扩展时间参数设置
TP1*)	扩展时间参数设置	标准时间参数设置

初始化还可分为物理初始化和功能初始化两种：

- 1) 物理初始化，这种方式中仅有一个 ECU 被初始化，地址字节由制造商控制。
- 2) 功能初始化，这种方式将有一组 ECU 被初始化。

10.2.5.2 停止通信服务

该 KWP 2000 通信层服务的目的是终止一个诊断通信。

10.2.5.3 寻址定时参数服务

该 KWP 2000 通信层服务的目的是读取和改变通信链路的默认定时参数。

10.2.5.4 发送数据服务

该 KWP 2000 通信层服务的目的是通过服务请求将数据发送到整个 KWP2000 通信链路上。

10.2.6 错误处理

这里介绍的是通信过程中关于错误的一些规定，主要分为以下几个方面：①开始通信服务；②主流通信；③ECU 检测诊断仪传输错误；④诊断仪检测车辆响应中的错误；⑤ECU检测 ECU 响应中的错误；⑥诊断仪检测诊断仪传输中的错误。

10.3 实现

10.3.1 作用范围

这部分规定了实现在 ISO 14229 中规定的诊断服务的需求，包括：

- (1) 服务标识符的字节编码和十六进制值。
- (2) 诊断服务请求和响应参数的字节编码。
- (3) 标准参数的十六进制值。

10.3.2 服务标识符值

服务标识符即数据场的第一个字节，它用来标志一种特定的服务。在该协议中定义标识符值的范围见表 1.6-82。

表 1.6-82 服务标识符值		
10~1F	请求 (BIT 6=0)	KWP 2000Part3
20~2F		
30~3E		
50~5F	肯定应答	
60~6F	用于服务 (\$ 10-\$ 3E)	
70~7E	(BIT 6=1)	KWP 2000 Part 3
7F	否定应答	
80	请求 'ESC' -码	
81~8F	请求 (BIT 6=0)	KWP 2000 Part 2
C0	肯定应答 'ESC' -码	KWP 2000 Part 3
C1~CF	肯定应答 (BIT 6=1)	KWP 2000 Part 2

标识符值与具体一种服务的对应情况见表 1.6-83。

表 1.6-83 服务标识符值摘要表

诊断服务名称	KWP 2000 实现	
	请求十六进制值	应答十六进制值
开始诊断	10	50
ECU 复位	11	51
读固定帧数据	12	52
读故障诊断码	13	53
清除诊断信息	14	54
读故障诊断码状态	17	57
...		

该表格最左侧一栏中列出的是诊断服务；中间一栏列出的是请求所对应标识符的十六进制值；最右侧一栏中列出的是肯定响应所对应标识符的十六进制值，它是将请求所对应标识符的第 6 位“置 1”而得到的。

10.3.3 服务描述规范

这部分规定了用来描述诊断服务的形式，它包括：①参数定义；②报文数据字节；③报文描述；④报文流实例。

10.3.3.1 参数定义

这部分定义了服务所使用参数的用途和数值。

10.3.3.2 报文数据字节

每个报文的定义是通过表格形式来完成的，表格中列出了其原语所携带的参数。每个报文数据字节的描述都采用相同的结构，共有 3 个表格：表 1.6-84 描述请求报文；表 1.6-85 描述肯定响应报文；表 1.6-86 描述否定响应报文（表格中展示了一般服务表的结构和语法）。

表 1.6-84 请求报文

类 型	参数名称	说明	十六进制值	助记码
报头字节	格式化字节	M	××	FMT
	目标字节	C1	××	TGT
	源字节	C1	××	SRC
	长度字节	C2	××	LEN
〈服务 Id〉	〈服务名称〉请求服务标识符	M	xx	SN
〈参数类型〉	〈参数列表〉 = [C3	×× = [PN
：	〈参数名称〉		××	
〈参数类型〉	：		：	
	〈参数名称〉		××	
]]	
CS	校验和字节	M	××	CS

表 1.6-85 肯定响应报文

类 型	参数名称	说明	十六进制值	助记码
报头字节	格式化字节	M	××	FMT
	目标字节	C1	××	TGT
	源字节	C1	××	SRC
	长度字节	C2	××	LEN
〈服务 Id〉	〈服务名称〉肯定应答服务标识符	M	××	SNPR
〈参数类型〉	〈参数列表〉 = [C3	×× = [PN
：	〈参数名称〉		××	
〈参数类型〉	：		：	
	〈参数名称〉		××	
]]	
CS	校验和字节	M	××	CS

表 1.6-86 否定响应报文

类 型	参数名称	说明	十六进制值	助记码
报头字节	格式化字节	M	××	FMT
	目标字节	C1	××	TGT
	源字节	C1	××	SRC
	长度字节	C2	××	LEN
〈服务 Id〉	〈服务名称〉否定应答服务标识符	M	××	NACK
〈服务 Id〉	〈服务名称〉请求服务标识符	M	××	SN
〈参数类型〉	应答代码 = [KWP2000 应 答 代码， 制造商详情]	M	×× = [00~7F, 80~FF]	RC
CS	校验和字节	M	××	CS

在表 1.6-84~表 1.6-86 中，说明如下：

(1) C1：条件 1 代表头部的“源字节”和“目的字节”依赖于“格式字节的内容”，具体规定在数据链路层中。在每个报文的头部中它们或者都存在或者都不存在。

(2) C2：条件 2 代表头部的“长度字节”依赖于“格式字节”，它的具体规定也在数据链路层中。

(3) C3：条件 3 代表这些参数可能是强制的（M）或者是用户可选择的（U），依赖于个别的报文。

(4) 响应代码参数〈responseCode〉仅在否定响应中使用，表示服务器不能够完成请求。

(5) 表格中每个参数的数值要视具体的服务和原语而定。

(6) 对于服务器接收到一个请求，返回的是肯定响应报文还是否定响应报文取决于它否能够完全地执行请求的动作。

(7) 三个表格的目的仅是为了介绍一下描述报文的结构和语法，并没有赋予具体涵义。

10.3.3.3 报文描述

这部分提供了由客户机和服务器所执行动作的一个描述，它仅适合于 KWP2000 数据链路。

10.3.3.4 报文流实例

这部分以表格的形式提供了报文流的描述，与表格有关的时间以从上至下的顺序，该表格由 3 列组成：

(1) 第 1 列：包括相关的报文间的定时，它在数据链路层中有详细的规定。

(2) 第 2 列：包括所有由客户机发送到服务器的请求。

(3) 报文流表格的读取入口始终以时间栏中的第 1 个条目 P3（第 1 栏）开始，它是一个客户机的请求报文（第 2 栏），下一个入口是定时参数 P2（第 1 栏），它用于服务器发送肯定或否定的响应报文（第 3 栏）。

报文流实例见表 1.6-87。

表 1.6-87 报文流实例

时间	客户机（诊断仪）	服务器（ECU）
P3	〈服务名称〉请求 [...]	
P2		〈服务称名〉肯定应答 [...]

为简单起见，所有的报文均无标识符和/或数据值方面的描述。报文的详细情况规定在报文数据字节部分。

10.3.4 功能单元表

规定功能单元表的目的是将相似的 KWP2000 服务分组到一个功能单元。关于功能单元种类和描述见表 1.6-88。

功能单元	说 明
诊断管理	本功能单元提供了 KWP2000 的如下服务：用来实现客户机（诊断仪）和服务器（ECU）间诊断管理功能
数据传输	本功能单元提供了 KWP2000 的如下服务：用来实现客户机（诊断仪）和服务器（ECU）间的数据传输功能
存储数据传输	本功能单元提供了 KWP2000 的如下服务：用来实现客户机（诊断仪）和服务器（ECU）间的存储数据传输功能
输入/输出控制	本功能单元提供了 KWP2000 的如下服务：用来实现客户机（诊断仪）和服务器（ECU）间的输入/输出控制功能
程序远程激活	本功能单元提供了 KWP2000 的如下服务：用来实现客户机（诊断仪）和服务器（ECU）间的程序远程激活功能
上载/下载	本功能单元提供了 KWP2000 的如下服务：用来实现客户机（诊断仪）和服务器（ECU）间的上/下载功能

11 汽车车上网络应用实例

11.1 车身 CAN 网络

车身 CAN 网络是一个连接中央门锁系统以及车门控制单元的 CAN 网络。网络采用星型结构，以保证在一个单元出现故障时，其他单元仍可以发送接收信息。使用网络连接方式实现这些控制单元间的通信，可以减少线路、提高通信线路的可靠性和容错能力、提高自诊断能力。该网络具有以下特性：

- (1) 传输介质采用双绞线。
- (2) 数据传输速度为 62.5kbit/s。
- (3) 每个网络节点发送信息的时间间隔为 20ms。
- (4) 优先级顺序依次为：①中央控制单元；②驾驶员侧前门控制单元；③乘客侧前门控制单元；④驾驶员侧后门控制单元；⑤乘客侧后门控制单元。

网络中传输的信息包括每个控制单元控制对象（门锁、车窗等）的状态、控制单元的工作状态、遥控器信号、故障状态等。表 1.6-89 是驾驶员侧前门控制单元发送的信息数据域的定义，其他控制单元传送的信息类似。

表 1.6-89 驾驶员侧前门控制单元信息						
功能 状态	状态 信息	数 据				
		D4	D3	D2	D1	D0
中央 门锁	基本状态			0	0	0
	安全状态			0	0	1
	上锁			0	1	0
	门锁已打开			0	1	1
	门已经锁上			1	0	0
	打开锁			1	0	1
	传感器故障			1	1	0
	状态故障			1	1	1
电动窗	运动中	0	0			
	静止	0	1			
	半开状态	1	0			
	已到顶	1	1			

图 1.6-78 是车身 CAN 网络的连接图。其中，接线端的定义为：

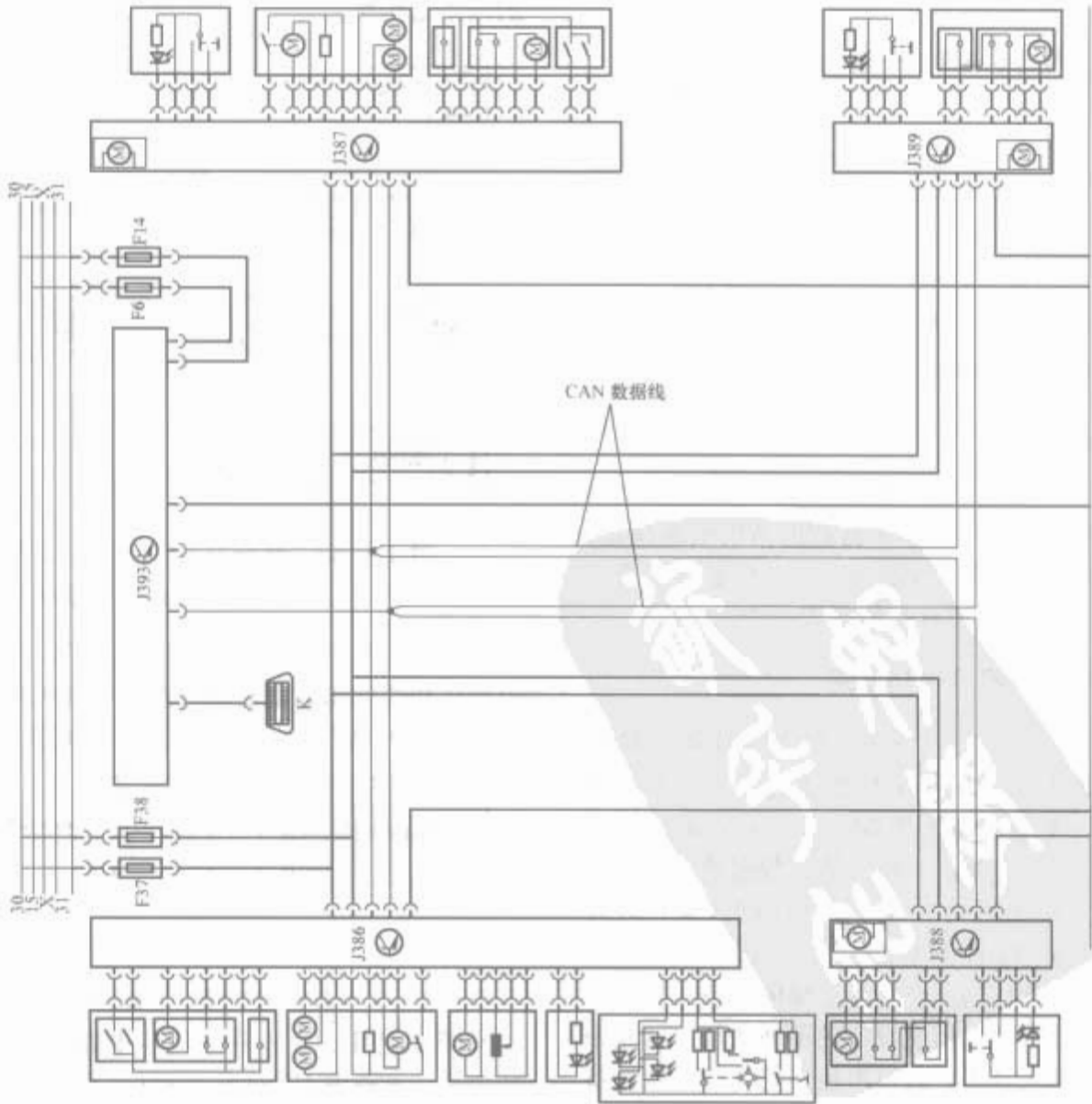


图 1.6-78 车身 CAN 网络连接图

- 15 号接线端：常供电电源。
- 30 号接线端：汽车电源。
- 31 号接线端：接地端。
- 各标号代表的元器件为：
- J386：驾驶员侧前车门控制单元。
- J387：乘客侧前车门控制单元。
- J388：驾驶员侧后车门控制单元。
- J389：乘客侧后车门控制单元。
- J393：中央控制单元。
- K：故障诊断系统接头。

11.2 动力传动系统 CAN 网络

使用 CAN 网络，可以实现动力传动系统各控制单元间的高速数据通信，使每个控制单元都可以获得整个动力传动系统的数据和工作状态，实现控制功能的整体优化。动力传动系统的控制功能要求数据传输的实时性，所以要求网络具有较高数据传输功能。比如在发动机控制中，为了计算点火控制参数，必须保证数据的传输间距小于两次点火之间的间隔。本例介绍的网络系统连接发动机控制单元、ABS/EDL 控制单元和自动变速器控制单元，它具有以下特性：

- (1) 传输介质为双绞线。
- (2) 总线数据传输速度为 500kbit/s。
- (3) 一帧数据的传输大约为 0.25ms。
- (4) 各控制单元大约每隔 7~20ms 发送一次数据。
- (5) 优先级顺序：①ABS/EDL 控制单元；②发动机控制单元；③自动变速器控制单元。

这个网络中传输的信息见表 1.6-90，它包括数据、状态和操作请求。

表 1.6-90 动力传动系统网络传输信息

优先级	发送单元	发送信息
1	ABS/EDL	发动机制动控制 (Engine Braking Control, EBC) 请求 驱动控制 (Traction Control System, TCS) 请求
2	发动机控制单元	发动机转速, 节气门开度
3	发动机控制单元	冷却水温度, 车速
4	自动变速器控制单元	变速器挡位, 操纵杆位置, 变速器状态

数据传输帧中数据域的长度，根据数据精度要求确定，如节气门开度范围为 0°~102°，数据域采用 8 位数（一个字节）；角度数据间距为 0.4°，也就是精度为 0.4°。

11.3 MOST 在汽车媒体网络中的应用

MOST 网络的特点非常适应汽车媒体设备应用环境的需要，所以汽车行业已经把 MOST 技术作为将来车上媒体系统的一个标准。汽车生产商采用 MOST，主要是由于它具有可靠、成本低、系统简单、结构灵活、数据兼容性好和良好的 EMI 性能。使用光纤可以减少 250m 的线束，减轻 4.5kg 质量。这种结构为将来可以随时加入新媒体设备节点的结构提供了基础，而且特别适合于车上媒体设备和信息设备的声控技术应用。随着车上信息设备的不断增加，驾驶中使用这些设备的情况越来越多，通过声控系统访问这些设备是最安全和最经济的方式，被认为是将来车上设备使用的首

选人机接口方式。通过 MOST 网络把人机语音接口与车上媒体设备、通信设备以及其他信息设备连接，是实现这种车上设备语音访问技术的有效方式。图 1.6-79 是用 MOST 实现这种车上媒体设备、信息设备连接的示意图。

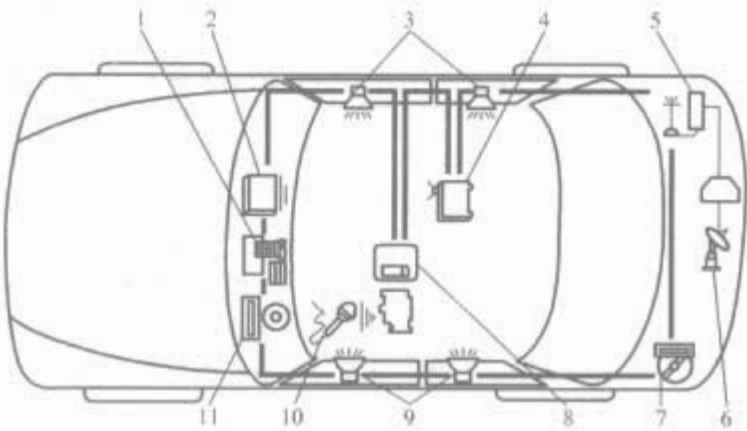


图 1.6-79 车上媒体设备、信息设备的 MOST 网络
1—计算机及键盘；2—显示器；3、9—音响；4—电视；
5—无线信号发送接收器；6—卫星信号接收机；7—CD-ROM
（电子地图等数据）；8—车载电话；
10—语音控制输入接口；11—CD (VCD) 播放机

11.4 LIN 网络应用

在雪铁龙公司的许多最新产品中都用到了 LIN 协议，尤其是与车道偏离预警 (AFIL) 电控单元和转向前照灯相关的控制单元。

在车道偏离预警 (AFIL) 系统中，借助于 LIN 协议，电控单元与探测车道分隔白线的一些传感器相连。这使得连接 AFIL 电控单元的线路数量减少。图 1.6-80 给出了相应的网络结构图。

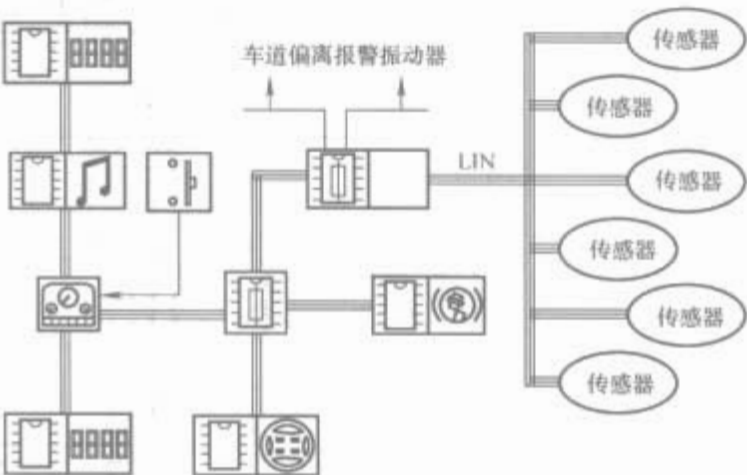


图 1.6-80 配合全 CAN 网络工作的 LIN 网络
（车道偏离预警系统）

在转向前照灯系统中，转向前照灯电控单元与高度调整电动机和摆动角调整电动机两个电动机相连。这两个电动机通过 LIN 网络与电控单元相连，参见图 1.6-81 和图 1.6-82。



图 1.6-81 转向前灯的 LIN 网络连接
在 2005 年款的雪铁龙 C5 轿车上有三个 CAN 网和一个 LIN 网被应用。图 1.6-83 所示电路图显示了电脑数据通信的关系。雪铁龙 C5 轿车上的 CAN 网络和 LIN 网络电路元件说明见表 1.6-91，电路图连接说明见表 1.6-92。

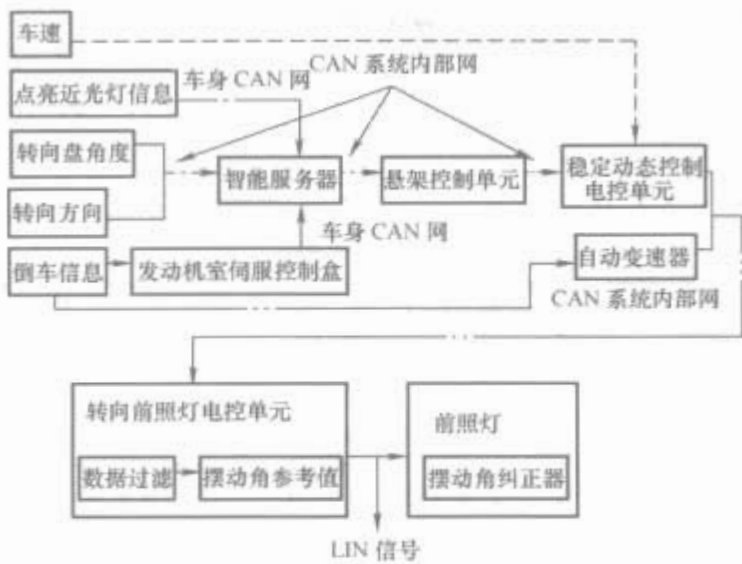


图 1.6-82 转向前灯方位角校正功能框图

表 1.6-91 雪铁龙 C5 轿车上的 CAN 网络和 LIN 网络电路元件说明

CAN 网元件		LIN 网元件	
BSI	智能服务器	7215	多功能显示屏
BSM	发动机室伺服盒	7700	转向盘角度传感器
CV00	转向盘下转换模块	7702	车身前部高度传感器
0004	组合仪表	7703	后车身的高度传感器
1320	发动机电控单元	7715	BHI 悬架电控单元
1630	自动变速	6606	转向前照灯电控单元
2202	倒挡开关 (手动变速器)	8410	汽车音响
2610	左前照灯		
2615	右前照灯		
7000~7005	左前轮/右前轮防抱死传感器		
7800	稳定动态控制电控单		

表 1.6-92 雪铁龙 C5 轿车上的 CAN 网和 LIN 网电路图连接说明

连接序号	信 号	连 接
1	高低角纠正指令	模拟信号
2	摆动角纠正指令	LIN 网
3	前车身的高度信息	模拟信号
4	后车身的高度信息	模拟信号
5	倒车信息 (针对手动挡)	模拟信号
6	照明指令状态	CAN 车身网
7	倒车信息 (针对手动挡)	CAN 车身网
8	倒车信息 (针对手动挡) 照明指令状态	CAN 车身网
9	车灯指令, 摆动角纠正启动/锁闭要求	CAN 舒适网
10	摆动角纠正启动/锁闭要求	CAN 舒适网
11	转向盘角传感器信	CAN I/S
12	转向盘角传感器信息, 车灯指令, 摆动角纠正启动/锁闭要求, 倒车信息 (针对手动挡), 照明指令状态	CAN I/S
13	转向盘角度传感器信息, 车灯指令, 摆动角纠正启动/锁闭要求, 倒车信息 (针对手动挡), 照明指令状态, 前车身高度信息, 后车身高度信息	CAN I/S

续表

连接序号	信 号	连 接
14	倒车信息 (针对自动挡)	CAN I/S
15	车速、发动机运转状态	CAN I/S
16	转向盘角度传感器信息, 车灯指令, 摆动角纠正启动/锁闭要求, 倒车信息, 照明指令状态, 前车身高度信息, 后车身高度信息, 车速, 发动机运转状态	CAN I/S
17	发动机运转状态	CAN I/S
18	前轮转速信息	模拟信号

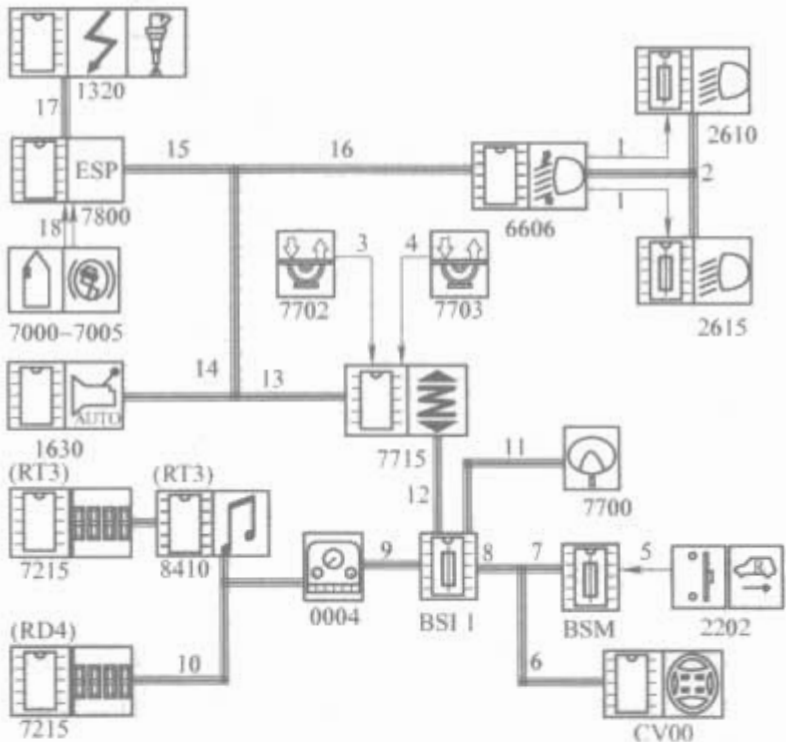


图 1.6-83 雪铁龙 C5 轿车上的 CAN 网络和 LIN 网络电路图

每一个在网络间流通的信息都要经过校验，如来源或发送者校验，或者接收者或收件者校验。大量的信息交流需要一个高速数据传输速度（流量）。BSI 扮演中央控制单元和监督者的角色，它负责管理电脑间的通信，兼容它们之间交流的报文信息（信息流量和不同的电平信号），授予安全信息优先处理权以及和诊断仪对话实现加载、远程编码和远程急修。

11.5 新型卡车 CAN/LIN 电气系统网络应用实例

11.5.1 电气系统网络组成与功能

新型卡车电气系统网络由低速 CAN 网络、LIN 网络及其电气设备组成，如图 1.6-84 所示。LIN 网络包括灯光照明子系统、门窗子系统和主节点，其中灯光照明子系统功能由室内灯控制节点、左前组合灯控制节点、右前组合灯控制节点、后组合灯控制节点联合完成；门窗子系统功能由左车门控制节点、右车门控制节点联合完成；主节点除了驱动刮水器和洗涤器电动机之外，还起到 CAN-LIN 网关的作用。每个模块内部各节点间通过 LIN 总线构成一个低端通信网络，完成对外围设备的控制。各个模块又作为一个节点，通过作为网关的主节点连接到低速 CAN 总线上，构成上层主干网，使整个车辆电气系统构成一个基于 CAN/LIN 总线的层次化网络，实现了真正的分布式多路传输，从而使网络连接的优点得到了充分发挥。

电气系统网络的控制功能根据节点的不同可分为三个部分：组合开关状态的读取、刮水和洗涤电动机的驱动、门窗



图 1.6-84 电气系统网络组成框图

和灯光的控制，具体情况见图 1.6-85。

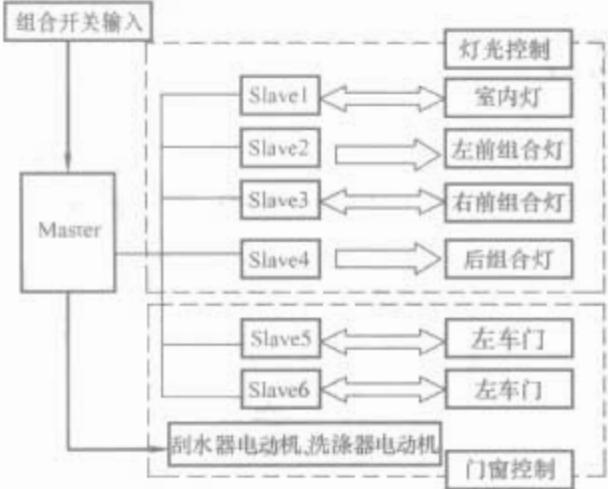


图 1.6-85 电气系统功能框图

11.5.2 通信协议

11.5.2.1 CAN 及其应用层协议

控制器局域网 CAN 是由德国 BOSCH 公司为解决现代汽车中众多的测量控制部件之间的数据交换问题而开发的一种数据通信协议。然而，CAN 总线毕竟只包含了物理层和数据链路层，可以说 CAN 并不是一种完整的控制网络技术。组成汽车内部网络可以基于 CAN 通信技术，但仅仅靠 CAN 还不足以支撑起一个控制网络，还需要对网络连接、网络管理及各种应用数据进行规范。SAE J1939 就是一种基于 CAN 的应用层协议，它由美国 SAE (Society of Automotive Engineers) 负责组织维护和推广，目前广泛应用于一些大型汽车中。该协议采用 CAN2.0B 的扩展帧格式，并进一步定义了 CAN 数据帧仲裁场中的标识位。J1939 报文帧采用协议数据单元 PDU (Protocol Data Unit) 进行信息传送。这个 PDU 包括 7 个预定义的域，它们是：优先级 (P)、保留位 (R)、数据页 (DP)、PDU 格式 (PF)、PDU 细节 (PS)、源地址 (SA) 和数据域。可以把它们打包成一个或多个 CAN 数据帧，从物理介质上发送给其他网络设备。

在本方案中，根据卡车的实际需要定义了符合 J1939 标准的灯光照明子系统信息，此信息通过作为网关的主节点上传给 CAN 总线上的仪表节点进行显示。信息报文和参数定义的详细情况见表 1.6-93 和表 1.6-94。

表 1.6-93 灯光照明系统报文

传输重复率	0.1s
数据长度	8Byte
数据页	0
PDU 格式	255
PDU 细节	0
优先级	6
源地址	0x47 (71)
参数组号	0xFF00
标识符	0x18FF0047

表 1.6-94 参数定义

字节	位	参 数
0	6~7	左前转向灯 00: Off 01: On (1.5Hz) 10: On (3Hz) 11: Error
	4~5	左侧转向灯 00: Off 01: On (1.5Hz) 10: On (3Hz) 11: Error
	2~3	左后转向灯 00: Off 01: On (1.5Hz) 10: On (3Hz) 11: Error
	0~1	右前转向灯 00: Off 01: On (1.5Hz) 10: On (3Hz) 11: Error
...		

11.5.2.2 LIN 及其应用层协议

LIN 总线为单主节点/多从节点模式，从节点无须价格较高的石英或陶瓷振荡器即可实现自同步。物理总线为低成本的单线，通过将价格低廉的 LIN 收发器挂在普通串行口上，再配以 LIN 驱动软件就可以构成一个 LIN 节点。由此可以看出，LIN 总线对软件/硬件和其他方面的配置要求都不高，它提供了一种低成本的局部汽车总线解决方案。然而，LIN 总线的带宽有限，无法胜任实时性要求较高的应用。在汽车应用中，它通常作为主干网络 CAN 的子网络，通过作为网关的主节点挂在 CAN 上，其典型应用为电动门窗、门锁控制、后视镜控制、转向助力控制、座椅控制等。

LIN 作为 CAN 总线的辅助网络，在设计时与 CAN 的最大区别在于，LIN 总线的设备驱动可通过软件方式实现。换句话说，它完全可以在没有硬件控制器的情况下完成 LIN 通信的所有功能。为实现上述功能，LIN 规范在 SCI/UART 接口的基础上规定了一套基于 C 语言（其他语言不在协议范围内）的应用程序接口 API 来完成类似读写寄存器功能的操作。在用户为任意节点建立应用程序时，API 隐藏了 LIN 网络配置的详细情况（例如信号是如何映射到帧的）。用户使用 API 在 LIN 网络中对其他节点进行读/写数据操作，整个过程不关心数据传输的具体细节。

在本方案中，LIN 总线的应用层协议完全是针对卡车的具体应用需求而制定的。在应用层通信协议中，定义了整车的照明灯、信号灯、车门门锁、电动玻璃升降器、电动后视镜、刮水电动机及洗涤器等总成使用的所有参数和报文。根据以上需求，LIN 应用层通信协议共定义了 7 条报文，分别为 CabLighting _ St、LeftDoor _ St、RightDoor _ St、FrontLeftLamp _ St、FrontRightLamp _ St、RearLamp _ St、Master _ Cmd。

LIN 报文的定义如下：

(1) LIN 速度的定义：

<LIN _ speed _ def> :: =
LIN _ speed = real _ or _ integer kbit/s; 范围可以为 5.0~20.0kbit/s。

(2) 节点报文的定义。这里仅以室内灯节点为例说明报文的定义，具体见表 1.6-95。

表 1.6-95 室内灯节点报文

帧名	ID	延时	发布方	字节位置	位位置	信号名	大小	偏移
CabLamp _ St (4Byte)	0x20	20ms	CabLamp (Slave1)	byte0	0	LeftDoorSw	1	0
					1	RightDoorSw	1	1
					2	Reserve	2	2
					4	SpeedLamp1St	2	4
					6	SpeedLamp2St	2	6
				byte1	0	LeftSideTurnLampSt	3	8
					3	RightSideTurnLampSt	3	11
					6	SpeedLamp3St	2	14
				byte2	0	LeftCabLampSt	2	16
					2	RightCabLampSt	2	18
					4	LeftDoorWarningLampSt	2	20
					6	RightDoorWarningLampSt	2	22
				byte3	0	CabOutLineLampSt	2	24
					2	Reserve	5	26

11.5.3 网络系统的软硬件

11.5.3.1 硬件

系统硬件结构如图 1.6-86 所示。由图可以看出，系统硬件主要由主节点模块（CAN/LIN 网关）、从节点模块、CAN 网络和 LIN 网络、读取各电气开关的智能电子开关电路、电源电路和执行器驱动电路等组成。由于 CAN 总线和 LIN 总线的传输协议、速度和地址分配空间等均不相同，所以在 CAN 网和 LIN 网之间需设置网关。该设备允许数据在具有不同协议和信息的两个网段间传输。从一个网段向另一个网段传送数据消息时，网关提供了将参数重新封装到新的报文中的方法。

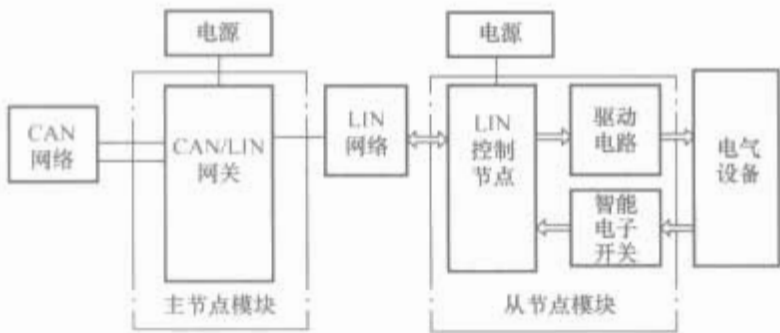


图 1.6-86 系统硬件组成框图

典型的硬件电路模块包括：

- (1) Motorola 控制器 MC68HC908GZ16、GR8、KX8 最小系统。
- (2) CAN 收发器和 CAN 收发电路。
- (3) Master 和 Slave 电源。
- (4) 21W 和 21W 以下负载灯光驱动电路和故障检测电路。
- (5) 21W 和 21W 以下灯光过流保护电路。
- (6) 开关检测电路，包括直接接入开关（路数较少时）和 SPI 扩展开关（路数较多时）。

(7) 21W 以上负载，包括电动机和灯光驱动电路和相关电路。

11.5.3.2 软件

系统软件由两部分组成：LIN 软件驱动程序和用户应用程序。软件驱动程序的任务是接收、发送和过滤报文，连接 LIN 节点到 LIN 总线上，并进行总线超时监测、帧监测、ID 场计算、数据长度提取、校验和计算及 LIN 调度等。本系统的应用程序建立在 Motorola 提供的软件驱动程序之上。

(1) LIN 驱动模块。LIN 驱动模块采用 Motorola 公司提供的 LIN08Driver。它能提供一套完整的 API 来完成 LIN 网络的各项控制任务。用户在使用 LIN08Driver 时需要进行如下方面的工作：

- 1) 修改 lincfg.h 头文件。每个节点的 lincfg.h 头文件都必须按照实际 LIN 网络的配置进行修改。
- 2) 修改 linmsgid.h 头文件。每个节点的 linmsgid.h 头文件都必须按照该节点的实际 LIN 配置进行修改。该头文件包含该节点必须处理的与该节点相关的 LIN 报文帧，并对这些报文帧的属性进行了定义。属性明确表明了该报文的 ID、数据长度以及报文的类别是发送报文、接收报文，还是更新后发送报文。

3) 编制 LIN Master 的调度表。调度表规定了 LIN 报文出现在 LIN 总线的顺序与间隔。它由 LIN Master 在定时器溢出中断服务程序中进行调用。

(2) 系统通信控制流程。系统网络的通信控制流程如图 1.6-87 所示，其中从节点以左前组合灯为例。

1) Master 节点的主函数流程内部为一个主循环，调用各个模块的控制子函数，实现最终的全部功能，包括整个 LIN 通信的调度、CAN 报文的发送和接收以及本身的电气控制（比如刮水、洗涤器和开关逻辑输入等）。

2) Slave 节点主函数控制流程主要实现各个控制函数输出的循环调度。

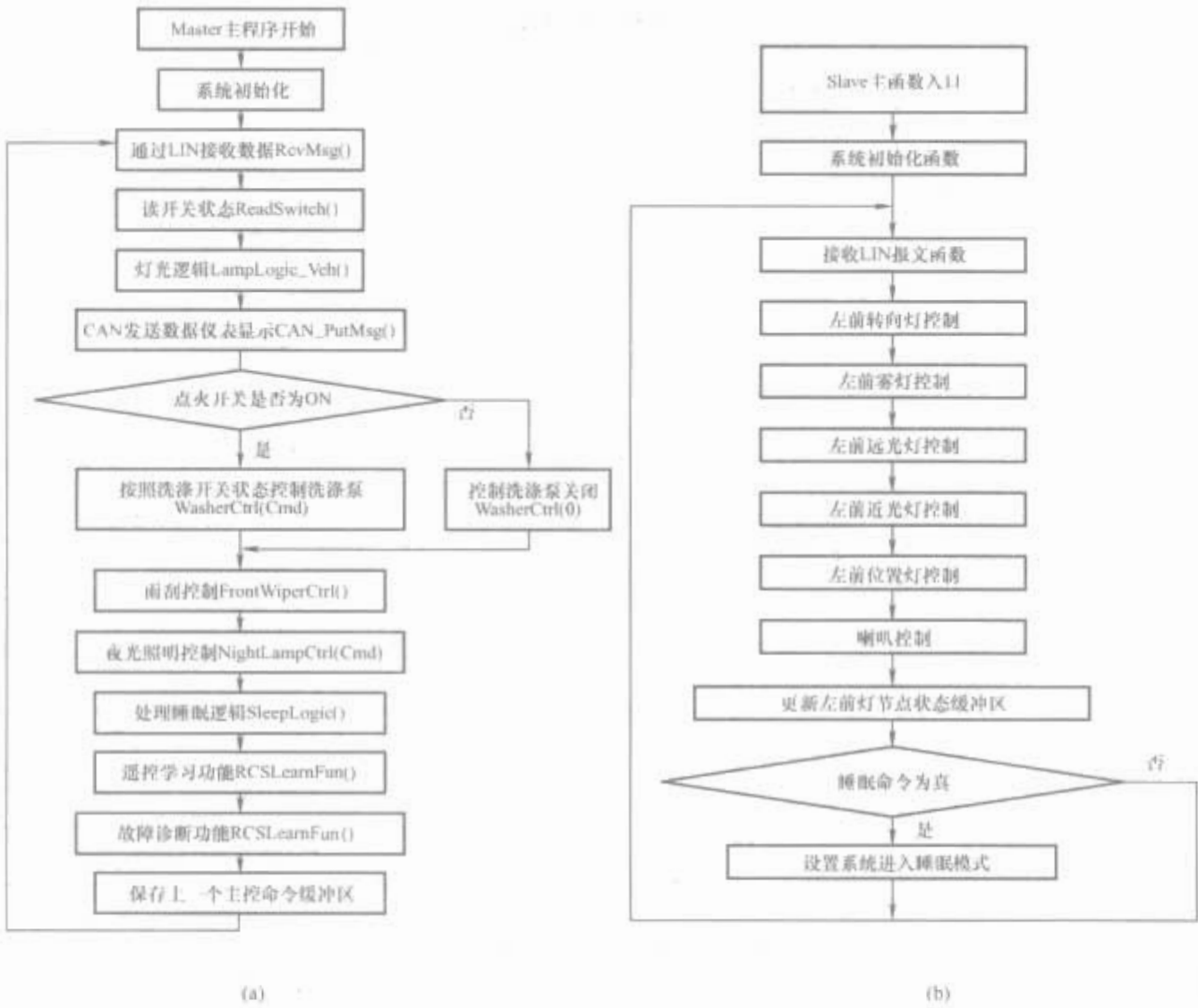


图 1.6-87 系统通信控制流程图
(a) Master 主函数流程图；(b) slave 主函数流程图

第7章 智能交通系统

1 智能交通系统概述

20世纪60~70年代,世界各国经济发展进入了高速增长时期,汽车数量急剧增加,导致已有的道路难以满足经济发展的需要,进而带来负面影响,产生了一系列交通问题。交通问题就是人、车与路之间的矛盾问题。为了解决这一矛盾,各国先后采用了控制需求、增加供给(修路)、加强城市交通管理等方法。这些方法都是从人、车和路单独的角度去解决交通问题,没有将这三者综合起来考虑,因此都存在一定的片面性,不足以经济而高效地解决交通拥挤和交通安全问题。

20世纪各种科学和技术有了长足的发展,特别是计算机、集成电路、人造卫星以及信息和通信技术的发展,使得人类的生活发生了飞跃式的变化。今天,信息技术和通信技术已经渗入到工业、农业、交通运输以及我们的日常生活中,成为传统行业焕发青春的新动力。因此,将人、车、路综合起来考虑,充分应用现代科学技术的智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS)为解决城市交通问题提供了全新的方法。

1.1 智能交通系统产生及概念

1.1.1 智能交通系统产生

发达国家智能交通系统发展的最原始动力,是科学家和工程技术专家发现:在交通高峰时期,中心城市道路系统和国家高速公路系统并不是全部都发生交通拥堵,有相当一部分道路仍然很畅通,于是他们设想如果能够及时地将道路网的交通信息告诉驾驶员,并提示他们可以绕行哪些路段,则道路网的资源就可以得到充分的利用。换言之,就是将交通高峰时期的车辆,有效地分布在道路网中,尽量缩短人们的出行时间。在研究这一问题的过程中,科学家们发现如果将电子信息技术引入交通系统,不但有可能解决交通拥堵,而且对交通安全管理、交通事故的处理与救援、客货运输管理、高速公路收费系统等方面都会产生巨大的影响,因此他们不断扩大研究、开发和试验的范围,智能交通系统应运而生。

1.1.2 智能交通系统的概念

智能交通系统是当今世界上交通运输科技的前沿。它是在较完善的道路设施基础上将先进的信息技术、数据通信技术、电子控制技术、全球定位技术、地理信息系统技术、计算机处理技术以及系统工程技术等综合运用于整个交通管理体系。通过对交通信息的实时采集、传输和处理,借助各种科技手段和设备,对各种交通情况进行协调和处理,建立起一种实时、准确、高效、智能的综合运输管理体系,从而使交通设施得以充分利用并提高交通效率和安全性,最终使交通运输服务和管理智能化,实现交通运输的集约化发展。

这个系统的一般运作流程为:将采集到的各种道路交通及服务信息经交通管理调度中心集中处理后,传输到交通运输系统的各个用户,出行者可利用它实时选择交通方式和交通路线;交通管理部门利用它进行交通疏导和事故处理;运

输部门可随时掌握车辆的运行情况,进行合理调度,从而使交通基础设施发挥出最大的效能,并提高服务质量,使社会能够高效地使用交通设施和能源,获得巨大的经济效益和社会效益。

1.2 智能交通系统体系框架

1.2.1 体系框架的意义和功能

智能交通系统的体系框架(也称为构架、体系结构、框架结构)主要用于明确智能交通系统的开发目标,为规范研究工作提供参考,避免重复性研究和无计划开发,便于研究成果的大范围应用和智能交通系统技术的发展以及产业化实现。

体系框架的主要功能如下:

(1) 保证通过各种媒体提供给终端用户的信息的兼容性和一致性,即任何终端用户都能通过不同的媒体获得相同的信息。

(2) 保证不同的交通基础设施的兼容性,从而可以保证在大范围内的畅通出行。

(3) 为地区、国家政府机关制定智能交通系统发展规划提供基本原则。

(4) 为服务和设备制造提供一个开放的市场,从而可以提供兼容的子系统。

(5) 确保设备制造商的规模经济,保证他们的更具竞争力的价格和更廉价的投资。

1.2.2 体系框架的组成部分

不同国家和地区智能交通系统的体系框架的内容有所不同,一般主要由以下几部分组成:用户服务、逻辑框架、物理框架和标准化等几部分。

1.2.2.1 用户服务

智能交通系统体系框架中的用户服务主要用来明确智能交通系统的用户及用户需求,明确划分智能交通系统中各个子系统的用户,并且通过用户调查、访问等形式确定各个子系统的用户需求等,对用户需求进行合理排序后指导实施顺序。

1.2.2.2 逻辑框架

逻辑框架是组织复杂实体和关系的辅助工具,其重点是系统的功能性处理和信息流情况。开发逻辑框架有助于明确系统的功能和信息流动,并能帮助得出对改进系统和新系统的功能要求。逻辑框架不决定由谁来实现系统中的功能,也不考虑实现这些功能的方式。相关的处理和数据流组合起来就可形成特定的交通管理功能。逻辑框架常用分层的数据流程图、数据词典和加工说明等来描述。数据流程图有四个基本部分:数据流(用箭头表示)、功能(用圆圈表示)、文件(用直线段表示)、外部实体(用方框表示)。数据流程图显示了每个领域的功能是怎样被分成高级和低级功能的。数据流程图还显示这些功能是如何联系在一起的,如何与不同的数据库联系在一起以及如何通过数据流与终端联系在一起。

1.2.2.3 物理框架

物理框架是智能交通系统的物理视图,它是关于系统应

该如何提供用户所要求的功能的物理性表述。物理框架把逻辑框架所认定的“处理”通过映射分配到物理实体（子系统）上，根据各物理实体所含的“处理”之间的数据流以确定实体之间的“体系结构流”。体系结构流对其通信的要求将决定物理实体之间的接口，是制定有关标准和协议的基础。

物理框架与交通和运输管理的体制有关。开发智能交通系统的物理框架将确定不同的交通运输管理组织之间期望的通信联系和相互作用。物理框架分为两个层次进行描述：运输层次和通信层次。运输层次显示运输管理组件形成的一种组织和运作关系；通信层次为运输层次各组件的连接提供通信服务。

1.2.2.4 标准化工作

标准化工作提出智能型综合交通运输系统所需关键技术的需求。所谓“标准”是指已被认可的、能够用来指导数据传输的技术规定或准则的文件。物理体系结构中所定义的子系统间是相互独立的，为了确保子系统间的整合性，就必须使子系统间的界面标准化。标准化需求文件（Standard Requirements Documents, SRD）详细描述智能交通系统的标准化需求及每项需求所对应的标准架构信息，但不为标准化进程提供时间表。标准化制定机构可以利用标准化需求文件所提供的信息来起草相应的标准文件。由于有了标准化需求文件，与标准化内容相关的公司或感兴趣的个人就很容易聚集到一起，开始实质性的标准化制定工作。需强调的是，标准化制定机构不会接手成员们不感兴趣的工作。

智能交通系统要设计多个交通系统，为了使各个系统能够很好地结合起来，必须有一套适用的标准体系作为保障。推荐目前成熟的技术标准或提出标准需求来确保智能交通系统的顺利实施。

1.3 各国的智能交通系统

自 20 世纪 80 年代末以来，欧洲、北美和日本竞相发展智能交通系统，成立了许多机构，制定并实施了开发计划。如美国智能交通系统协会、欧洲道路运输通信信息实施协调组织（European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization, ERTTICO），日本的车辆、道路、交通智能协会（Vehicle, Road and Traffic Intelligence Society, VERTIS），现改为 ITS Japan，以及国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）的智能交通系统技术委员会（ISO/TC204）等。1986 年，欧洲启动智能交通系统研究的第一批项目 Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe (DRIVE) 和 Programme for European Traffic with highest Efficiency and Unprecedented Safety (PUTHEUS)，日本开始 Comprehensive Automobile Control System (CACS) 实验研究，其后美国开始启动 PATHFINDER 和“2000 年的交通模式”研究项目。除了欧、美、日以外，新兴的工业国家和发展中国家也开始智能交通系统的全面开发和研究，如韩国由交通部牵头制定了全面的智能交通系统框架结构和发展计划，新加坡已经在全国开始推行不停车收费，中东的一些国家也开始讨论本国智能交通系统的研究计划。许多国家对智能交通系统进行了大量的研究，但各国各地区的研究领域和侧重点有所不同，本节将分别介绍各个国家的智能交通系统。

1.3.1 美国智能交通系统

1.3.1.1 主要研究内容

根据美国国家智能交通系统体系，美国智能交通系统的

研究内容包括 7 大领域（基本系统）、29 个用户服务功能（子系统）以及 60 个市场包，它们共同构成了美国智能交通系统的研究领域。美国智能交通系统研究的 7 大领域和 29 项用户服务功能见表 1.7-1。

表 1.7-1 美国智能交通系统的研究领域及其研究内容

序号	研究领域	主要研究内容
1	出行和交通管理系统	(1) 途中驾驶员信息系统 (2) 线路引导系统 (3) 出行人员服务系统 (4) 交通控制系统 (5) 突发事件管理系统 (6) 排放测试和污染防护系统
2	出行需求管理系统	(1) 出发前的出行信息系统 (2) 合乘配载和预约系统 (3) 需求管理与运营系统
3	公共交通运营系统	(1) 公共运输管理系统 (2) 途中换乘信息系统 (3) 满足个人需求的非定线公共交通系统 (4) 出行安全系统
4	商用车辆运营系统	(1) 商用车辆电子通关系统 (2) 自动化路侧安全检测系统 (3) 商用车辆管理程序系统 (4) 车载安全监控系统 (5) 商用车辆交通信息系统 (6) 危险品应急反应系统
5	电子收费系统	
6	应急管理系统	(1) 紧急通告与人员安全系统 (2) 应急车辆管理系统
7	先进的车辆控制和安全系统	(1) 纵向避撞系统 (2) 横向避撞系统 (3) 交叉口避撞系统 (4) 视觉强化避撞系统 (5) 事故前乘员安全保护系统 (6) 危险预警系统 (7) 自动公路系统

(1) 出行和交通管理系统。出行和交通管理系统包括城市道路信号控制、高速公路交通监控、交通事故处理等公路交通管理的各种功能，以及用来研究和评价交通控制系统运行功能与效果的三维交通模拟系统。系统能够对路网中交通流的实时变化作出及时、准确的反应，帮助交通管理部门对车辆进行有效的实时疏导、控制和事故处理，减少交通阻塞和延误，从而最大限度地发挥路网的通行能力，减轻环境污染，节约出行时间和运输费用，提高交通系统的效率和效益。该系统有 6 个子系统。

(2) 出行需求管理系统。出行需求管理系统向用户提供有关出行信息，改善交通需求管理。将该系统与出行和交通管理系统结合起来，驾驶员就可以通过车载或处所计算机和无线通信获得各种交通信息（道路条件、交通状况、服务设施位置和导游信息等），合理选择出行方式、时间和路线。驾驶员还可利用车载定位导航仪，在车载计算机上给出出发地点和目的地，计算机便可根据实时交通信息自动选择出最佳行驶路线，避开交通拥挤和阻塞，并促进高乘载率车辆的使用，从而提高运输效率。该系统包括 3 个子系统。

(3) 公共交通运营系统。公共交通运营系统用以提高公共交通的可靠性、安全性及其生产效率，使公共交通对潜在

的用户更具有吸引力。系统包括有交通标志占先权（高乘载率车辆专用车道的设置）、车辆定位和跟踪系统、语音和数据传输系统。系统将公共交通管理部门与驾驶员直接联结起来，进行实时调度和行驶路线的调整，帮助运输部门增加客运率，降低运营成本，提高运输效益。该系统有 4 个子系统。

(4) 商用车辆运营系统。商用车辆运营系统在州际运输管理中自动询问和接受各种交通信息，包括为驾驶员提供一些特殊的公路信息，如桥梁净高、急弯陡坡路段的限速等，对运送危险品等特种车辆的跟踪以及车辆和驾驶员的状况进行安全监视与自动报警。在特种车辆自动报警系统中，还装有探测靠近障碍物的电子装置，可保证在道路可见度很低的情况下的行车安全。通过这一系统，可使营运车辆的运营管理更加合理化，使车辆的安全性和生产效率得到提高，使公路系统的所有用户都能获益于一个更为安全可靠的公路环境。该系统有 6 个子系统。

(5) 电子收费系统。电子收费系统通过电子卡或电子标签由计算机自动收费，可使包括道路通行费、运输费和停车费等所有的地面交通收费实现自动化，以减少用现金收费所产生的延误，提高道路的通行能力和运行效率，并可为系统管理提供准确的交通数据。电子收费系统采用先进的电子扫描技术和车辆自动识别电子技术，实现收费车道上无人管理、不停车、不用票据的自动收费。该系统只有电子收费 1 个子系统。

(6) 应急管理系统。应急管理系统用以提高对突发事件的报告和反应能力，改善应急反应的资源配置。该系统有 2 个子系统。

(7) 先进的车辆控制和安全系统。先进的车辆控制和安全系统应用先进的传感、通信和自动控制技术，给驾驶员提供各种形式的避撞和安全保障措施。系统具有对障碍物的自动识别和报警，自动转向、制动、保持安全距离等避撞功能。这些功能在很大程度上改善和代替了驾驶员对行车环境的感应和控制能力，提高行车安全性，从而也进一步提高了道路的通行能力和运输效益。该系统包括 7 个子系统。

1.3.1.2 逻辑框架

美国国家智能交通系统的体系结构定义了一套与用户服务相对应的功能和信息流（或数据流），并用数据词典和加工说明对其进行了详细描述。图 1.7-1 是美国智能交通系统体系框架中简化了的最顶层逻辑框架图。根据用户服务需求确定智能交通系统体系框架的逻辑框架的过程就是由图 1.7-1 出发、向下逐层落实更细节的逻辑框架的过程。用户服务需求的确定情况，将直接决定逻辑框架中细节化的重点和细节的具体内容。

1.3.1.3 物理框架

图 1.7-2 显示了美国智能交通系统体系框架的 19 个子系统（矩形框）及子系统之间交换信息的 4 种基本通信连接方式（椭圆形框），是智能交通系统物理框架的顶层视图。这些子系统对应于运输管理系统的物理组件，被分为 4 类：中心子系统（Center Subsystems）、路侧/路边/路旁子系统（Roadside Subsystems）、车辆子系统（Vehicle Subsystems）和出行者/旅行者子系统（Traveler Subsystems）。

中心子系统。该类子系统的共同特点是空间上的独立性，即在空间位置的选择上不受交通基础设施的制约。这类子系统与其他子系统的联络通常依赖于有线通信。

路侧子系统。这类子系统通常需要进入路边的某些具体位置来安装或维护诸如监测器、信号灯、可编程信息板等设

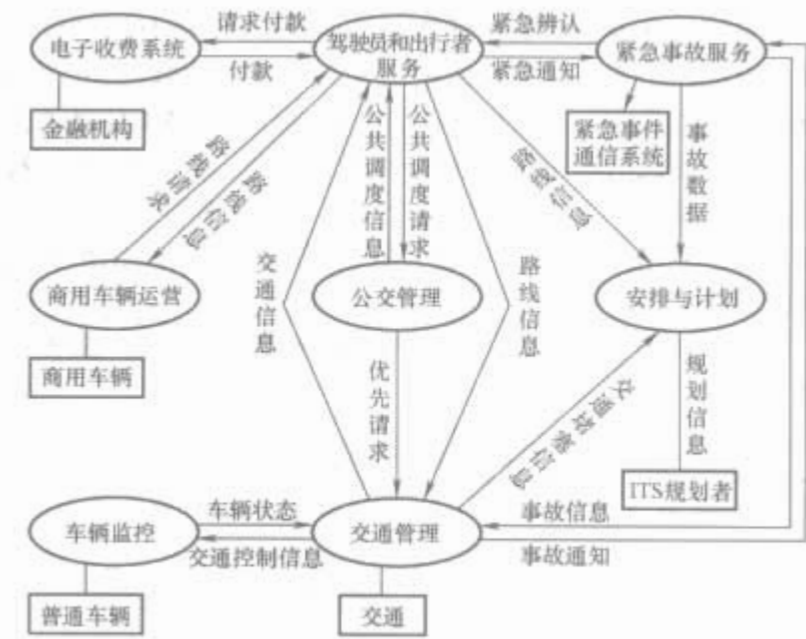


图 1.7-1 美国智能交通系统的逻辑结构

施。该子系统一般要与一个或多个中心型子系统以有线方式连接，同时还往往需要与通过其部署路段的车辆进行信息交互。

旅行者子系统。该类子系统以旅行者或旅行服务业经营者为服务对象，运用智能交通系统的有关功能实现对多种形式旅行的有效支持。

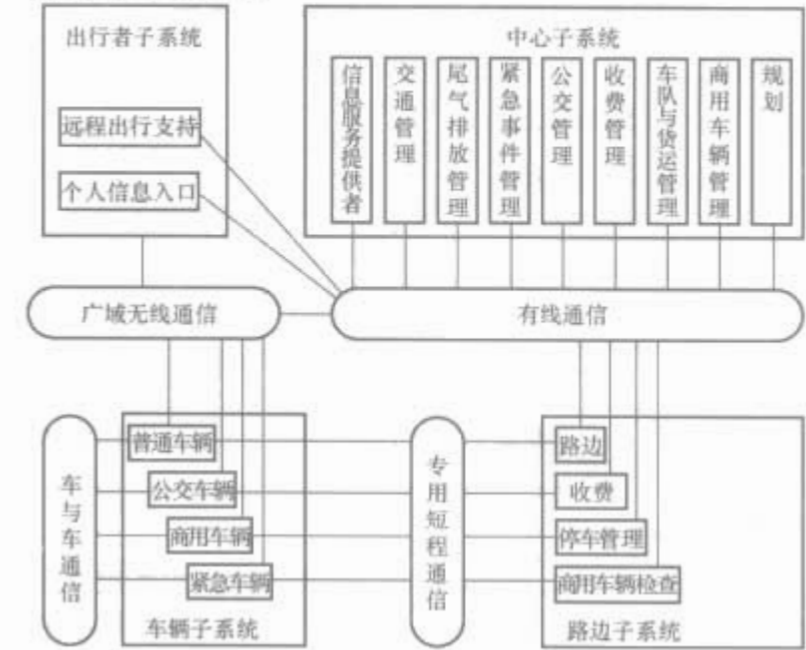


图 1.7-2 美国智能交通系统简化的顶层物理框架图

车辆子系统。该类子系统的特点是安装在车辆上。该子系统可根据需要与中心子系统、路侧子系统及出行者子系统进行无线通信，也可与其他车辆进行车辆间通信。

每种类型的子系统通常共享通信单元。作为子系统间信息通道（Interconnect Channel）的一个构成部分，通信单元所起的作用仅仅是传递信息，并不参与智能交通系统的信息加工和处理。

每个子系统又可进一步划分成更细的标准功能单元。在工程实践当中，子系统中若干类似的功能单元通常被整合在一起，形成一个以软件或硬件方式可实现的功能组合。对这样的功能组合的实现称为设备组件（Equipment Package）。设备组件对应于物理结构中最基本的功能组合，是子系统部署的基础部件。因此，设备组件可用来估算子系统的实施费用。

1.3.2 日本智能交通系统

1.3.2.1 主要研究内容

1996 年 7 月，日本 5 个政府机构联合制定发表了“关

于推进智能交通系统的整体构想”，它成了其后日本智能交通系统工作的主体计划，并制定了 9 个开发领域和 20 项服务内容。近几年，又增加了一项新的内容，即高度信息通信社会相关信息的利用。总计 21 个用户服务，被分为 56 个特定的用户服务，再细分为 177 个子服务，从而形成一个包括发展领域、用户服务、特定的用户服务和子服务 4 个层次的系统服务结构。

日本智能交通系统研究的 9 大领域和 21 项用户服务功能见表 1.7-2。

表 1.7-2 日本智能交通系统的研究内容

序号	开发领域	研究内容
1	导航系统的智能化	(1) 提供交通相关信息 (2) 提供目的地信息
2	自动收费系统	自动收费
3	安全驾驶支援系统	(1) 提供行驶环境信息 (2) 危险报警 (3) 辅助驾驶 (4) 自动驾驶
4	交通管理的最佳化	(1) 交通流量最佳化 (2) 提供发生交通事故时的交通管制信息
5	道路管理的高效率	(1) 道路管理业的高效率 (2) 特殊车辆等的管理 (3) 提供限制通行信息
6	公共交通的支援	(1) 提供公共交通利用信息 (2) 公共交通的运行、管理支援
7	提高商用车的利用率	(1) 商用车的运行、管理支援 (2) 商用车的连续自动驾驶
8	帮助行人等	(1) 路线引导 (2) 防止危险
9	紧急车辆的运行支援	(1) 紧急时自动报警 (2) 紧急车辆路线引导、支援救援活动
10	提供与信息化社会其他领域的接口	在先进的信息化社会中利用先进的信息

1.3.2.2 逻辑框架

从子服务的定义出发，分析实现每一个子服务应该进行什么处理。其具体工作是分析使用情况、识别为提供服务所需要的重要的信息和功能、将信息归于信息模型、用控制模型建立信息与功能的联系。

(1) 分析使用情况。通过“目的和内容”定义各子服务，表明为实现服务、系统与用户之间应有哪些信息交换，系统要处理哪些信息，确定服务的“执行者”和服务的“诱发者”，得到“使用情况表”，从而识别信息和功能。

(2) 建立信息模型。

1) 信息模型：为了保证在所有子系统中一致地使用这些信息和使系统体系结构具有柔性（对服务的改变或增加的适应能力），将各种各样的信息归于不同的类（“Class”），相关联的信息类链接成信息模型。

2) 整体模型和领域模型：一个领域内的信息类相互关联成领域模型，各领域最重要的信息或全局统一的信息链接成整体模型。

3) 地理视图和物理视图：为了方便，一个信息在不同的服务中可以从不同的角度进行不同的描述。如“抛锚对象的定位”，在“先进的导行系统”领域中，位置用道路和交叉口的名称或道路名称和距某个特定点的距离表示比较方便；而在“安全驾驶辅助”中，位置需要表示成在某移动对象即将发生碰撞前与移动对象的相对距离。这种信息放在同

一个模型中表示就相当困难。地理视图使用绝对的地理坐标来描述所需要的信息。物理视图使用相对的物理坐标来描述所需要的信息。

4) 核心模型和复杂模型：核心模型提供整个智能交通系统处理的信息的一个鸟瞰，如顶层类之间的关系，即最重要的信息及其关系。而复杂模型提供核心模型中没有表示的具体的信息，这种模型侧重于表达信息的层次结构。

5) 控制模型：在逻辑框架中除了信息类外还有控制类。控制类定义一个不含信息转换的系统内的处理。“控制类+信息转换+信息类”称为控制模式，一共有五种控制模式：收集、通知、通告、控制和确认。控制模式中的信息类表示信息，信息转换和控制类合起来表示功能。控制模型表示信息和功能的关系。

1.3.2.3 物理框架

物理框架按照逻辑框架定义对应用户服务的子系统结构，包括子系统之间交换的信息。系统分量是将逻辑框架中的每一个功能分配到路边、中心和车辆得到的。一个服务的物理模型提供一个智能交通系统子系统的框架。一个个子系统的物理模型联合构成整体物理模型。

1.3.3 欧洲智能交通系统

1.3.3.1 主要研究内容

欧洲智能交通系统的定义是：智能交通系统是利用信息、运输及通信等技术应用于车辆及道路基础设施的运作，以改善运输机动性，同时增进运输安全、减少交通拥挤及提高行车舒适程度，并减少环境冲击。其主要研究内容有：①交通管理；②行前信息；③行程中信息；④车辆控制；⑤货物及车队管理；⑥自动收费。

欧洲智能交通系统的研究有如下两条主线：以车辆的研究开发为主体的 PUETHEUS 研究计划和以道路基础设施开发为主题的 DRIVE 研究计划。

1989~1991 年的 DRIVE I，以基础研究和标准化为主要研究内容，分成模型和一般问题、安全和人的行为分析、交通控制和其他四个研究领域、72 个研究题目，由企业、大学和研究所分别承担。继 DRIVE I 之后，欧洲于 1992~1994 年又完成了 DRIVE II，其主要研究内容如表 1.7-3 所示。

表 1.7-3 DRIVE II 计划的主要研究内容

序号	内 容
1	需求管理：小汽车和公共汽车的自动收费管理，智能卡的评价
2	交通旅游信息：道路、铁路、换乘等各种信息的服务
3	城市综合交通管理：路径诱导、交通信息、交通控制、停车场管理
4	城市间综合交通管理：事故/交通量的自动检测，可变标志，气象信息
5	驾驶支持、协调系统：残疾人、老人用人机对话危险预警（车车间、车路间通信）
6	货物、车队管理：管理方式最优化，信息管理
7	公共交通管理：运营计划，与信息系统的联系及标准化

1986 年开始实施的“尤利卡”（EUREKA）计划极大地促进了欧洲智能交通系统的发展。近年来，欧盟智能交通系统的主要研究工作包括 T-TAP 计划（1994~1998）和 TEN-T 计划（1995~1999）。

相当于 DRIVE III 的信息处理技术的研究计划 T-TAP（The Telematics Applications Programme），其主要目标是运

用先进的信息处理技术来提高交通效率、保障安全和改善环境，从而极大提高欧洲工业的竞争力，提高交通运输水平。T-TAP 的研究涉及全交通方式，主要研究内容有：旅行者多方式的公共交通、货运运营管理、道路交通、航空交通、铁道交通、水上交通、交通公共设施服务、智能交通系统对欧盟政策的贡献。

TEN-T 是 1995~1999 年欧盟委员会推进的以实现多方式信息服务为目的的横贯欧洲交通信息服务网络，这是欧洲智能交通系统持续发展的关键所在。TEN-T 覆盖了交通运输的各个方面，包括高质量的公路、铁路、港口、机场和内陆航运。TEN-T 划分为三个层次：欧洲规模、欧洲地域、国家及区域。欧洲规模项目用于提供整个欧洲范围的智能交通系统服务；欧洲地域项目是通过可共同操作的调配、国境地带的无缝服务来促进国家之间的合作；国家及区域这一层次研究、发展并实行对欧盟智能交通系统发展有重大贡献的项目。

欧盟各国在欧盟委员会的领导下于 1998 年 4 月开始了代号为 KAREN (Keystone Architecture Required for European Networks) 项目，进行欧盟智能交通系统体系框架的开发，并于 1999 年 8 月和 10 月分别推出了其逻辑框架和物理框架。

1.3.3.2 KAREN 逻辑体系结构

KAREN 功能体系结构描述了欧洲智能交通系统满足 KAREN 所列举的用户需求的功能及这些功能如何与外部世界联系起来，特别是与智能交通系统使用者之间的联系，它也描述了智能交通系统中使用的数据库。

KAREN 以一系列功能领域的方式描述了智能交通系统的功能体系结构，每个功能领域都定义了功能及数据库，这些数据库与终端相联系，这些联系即所谓的数据流。

在最高层次上，KAREN 功能体系结构由一系列功能领域组成：提供电子付费、提供安全和紧急情况处理、交通管理、管理公共交通运营者、提供先进的驾驶便利、提供出行者旅行辅助、为法律保障提供支持、货物管理和车队调度。

KAREN 为每个功能领域开发了数据流图。KAREN 开发的所有体系结构模块都与用户需求紧紧地联系在一起，它提供了系统模块与用户需求之间的通道。

1.3.3.3 KAREN 物理体系结构

物理体系结构描述了在功能体系结构中定义的功能如何被集成起来形成系统，这些系统将由硬件或软件或软硬件集成。

KAREN 开发了一系列的示范系统来显示功能体系结构是如何被用来建立一个特定系统的。他们并不提供可以从功能体系结构产生的所有系统的列表，这些系统是基于功能体系结构的一部分，他们响应 KAREN 用户需求的需要。

在物理体系结构中描述的系统覆盖了以下的领域：电子付费、安全和紧急情况处理、综合交通管理、公共交通运营、先进的驾驶便利、出行者旅行辅助、法律约束、货物管理和车队调度。

1.3.3.4 KAREN 通信体系结构

KAREN 通信体系结构描述了支持在不同系统部分之间进行信息交换的机制。

信息的交换包括两部分：①可以使数据从一个点传到另一个点的机制及费用、准确率和延迟方面考虑的适应性；②如何确保从一个点传来的信息在另外一个点能被正确地解释和利用。

KAREN 为在物理框架中描述的系统确定了 5 个主要部

分。中心、交通“亭”、路侧单元、车辆、行人，他们之间一对一的通信是必要的。

1.3.3.5 KAREN 提出的标准问题

随着物理框架的完成，KAREN 确定了一些标准需求，以及一些需求进行标准化工作的领域。

KAREN 定义的一些标准问题的例子为：公共交通运行、商用车辆管理、专用短程通信系统 (Dedicated Short Range Communication System, DSRC) 的无线连接、法律约束、交通信息。

在考虑用户、供应商和运营者的观点的前提下，已经制定了一个框架，用来确定哪些行业标准是需要的。在 CEN 的推荐下，那些已经确定的标准工作的领域应当被逐步加强。

KAREN 与 CENTC278 建立了紧密的联系，CENTC278 正从事与道路交通和交通通信方面的标准开发工作。

1.3.4 中国智能交通系统

(1) 主要研究内容。中国国家科技部于 2000 年 3 月组织全国交通运输领域专家组成智能交通系统专家组，针对“九五”国家科技攻关项目“中国智能交通系统体系框架研究”，采用了面向过程的方法，起草了“中国智能交通系统体系框架”，它自然、直观、易于理解。中国智能交通系统的体系框架共分为 8 个服务领域、34 项服务内容、138 项子服务，见表 1.7-4。

表 1.7-4 中国智能运输系统的服务领域与服务体系

序号	服务领域	服务内容
1	交通管理与规划	(1) 交通法规监督与执行 (2) 交通运输规划支持 (3) 基础设施维护管理 (4) 交通控制 (5) 需求管理 (6) 紧急事件管理
2	电子收费	电子收费
3	出行者信息	(1) 出行前信息服务 (2) 行驶中驾驶员信息服务 (3) 在途公共交通信息服务 (4) 个性化信息服务 (5) 路径诱导及导航服务
4	车辆安全和辅助驾驶	(1) 视野范围的扩展 (2) 纵向防撞 (3) 横向防撞 (4) 交叉路口防撞 (5) 安全状况 (检测) (6) 碰撞前乘员保护 (7) 自动车辆驾驶
5	紧急事件和安全	(1) 紧急情况确认及人身安全 (2) 紧急车辆管理 (3) 危险品及事故通告 (4) 公共出行安全 (5) 易受伤害道路使用者的安全措施 (6) 交汇处的安全服务
6	运营管理	(1) 公交规划 (2) 车辆监视 (3) 公交运营管理 (4) 一般货物运输管理 (5) 特种运输的管理
7	综合运输	(1) 交换客货运信息资源 (2) 提供旅客联运服务 (3) 提供货物联运服务
8	自动公路	自动公路

(2) 逻辑框架。根据服务领域和用户主体的确定就可以构筑逻辑框架，中国智能交通系统的逻辑框架为层次结构，逻辑层次分为功能域、系统功能、过程、子过程。功能域包括交通管理与规划、电子收费、出行者信息、车辆安全和辅助驾驶、紧急事件和安全、运营管理、综合运输、自动公路、交通地理信息及定位技术平台和评价。逻辑框架最主要的内容就是描述系统功能和系统功能之间的数据流。系统功能和数据流可以参阅已经正式出版的《中国智能运输系统体系框架》中有关功能描述表和数据流描述表。中国智能交通系统体系框架中逻辑框架的顶层结构如图 1.7-3 所示。

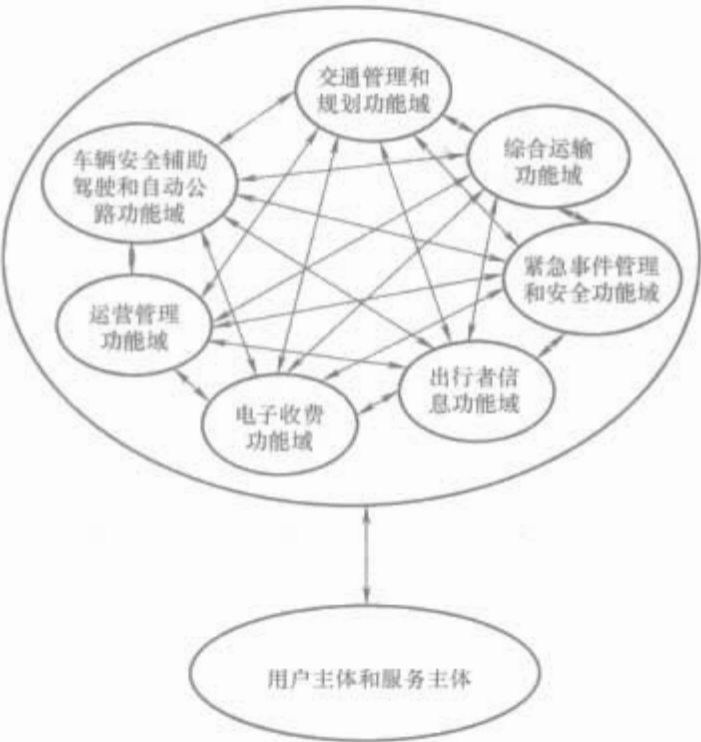


图 1.7-3 中国逻辑框架顶层结构

(3) 物理框架。物理框架是逻辑框架的具体实现。物理框架是一些系统和子系统连接构成的。系统和子系统基本上是按交通系统的习惯和职能进行划分的。中国智能交通系统的物理框架同样为层次结构，物理层次分为系统，子系统、模块。图 1.7-4 是两种不同的物理顶层结构之一，基本上可以顺应目前中国不同的管理体制。

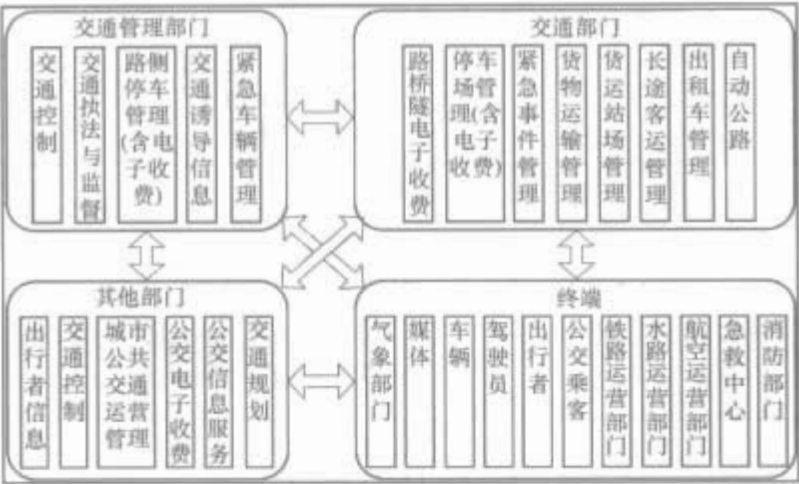


图 1.7-4 中国物理框架顶层结构

1.3.5 ISO 标准中的 ITS 服务领域

国际标准化组织于 1999 年在技术报告 ISO/TR14813 中对运输信息和控制系统（实际上就是智能交通系统）的服务进行了划分，具体划分情况见表 1.7-5。

表 1.7-5 ISO 标准中的服务领域构成		
序号	服务种类	服 务 名 称
1	出行者信息	出行前信息服务
		在途驾驶员信息服务
		在途公共交通信息服务
		个人信息服务
		路径诱导及导航服务
2	交通管理与规划	交通运输规划支持
		交通控制
		紧急事件管理
		需求管理
		交通法规监督与执行
		基础设施维护管理
3	车辆安全和辅助驾驶	视野范围的扩展
		自动车辆驾驶
		纵向防撞
		横向防撞
		安全防备
		交叉路口防撞
		碰撞前乘员保护
4	商用车辆管理	商用车辆提前通关
		商用车辆管理过程
		自动路边安全检测
		商用车辆车载安全监视
		商用车队管理
5	公共交通管理	公共交通规划
		公交车辆监控
		公共交通管理
6	紧急事件	紧急情况确认及个人安全
		紧急车辆管理
		危险品及事故通告
7	电子收费	电子收费
8	安全	公共出行安全
		易受伤害道路使用者的安全措施
		交叉口安全的智能化

1.4 智能交通系统的标准化

1.4.1 标准与标准化

所谓标准就是指为了在一定范围内获得最佳秩序和效益，对活动或其结果所规定的共同的、可重复使用的规则、准则或特定文件的总称。标准要以科学、技术和实践经验为基础，要经过充分协商并得到公认机构的批准。而标准化是指制定、发布和实施标准的全过程。

标准化是现代化大生产的必要条件，是组织专业化生产的前提，是科学管理的重要组成部分，是提高产品质量的技术保证，是合理利用资源、保证安全的重要途径，是推广应用新技术的桥梁。

1.4.2 智能交通系统标准化及其作用

交通运输作为一种社会化大生产，标准化同样是必不可少的。尤其应该强调的是，智能交通系统是先进信息技术、通信技术、电子技术和交通运输管理系统相结合的复杂大系

统，它使人、车、路的相互关系更加协调，从而提高道路交通的效率、机动性和安全性。智能交通系统的最基本特征就是集成性，而标准化是系统集成的重要基础。没有标准化，就不可能实现有效的智能交通系统。因此，对与智能交通系统广泛相关的技术要素制定国际统一的社会规则即国际标准是十分必要的。

标准化在生产和科学技术发展中所起的重要作用是显而易见的，在智能交通系统的实施过程中也必将发挥重要作用。智能交通系统结构框架的建立可以大大促进智能交通系统理论的发展和具体项目的实施，但它并不能直接保证其在全国和全球范围内的兼容性。标准化工作在智能运输系统实施过程中的主要作用表现在：

(1) 标准化可保障智能交通系统在全国甚至全球范围内的兼容性。结构框架中的物理实体之间存在许多技术接口，接口技术的标准化可保证物理实体的互联性，从而实现全国范围内的兼容性。例如，如果车辆与道路之间的短程通信接口实现了标准化，则配备了这种接口的终端将能在全国内接收到路侧通信设施所发出的交通信息。

(2) 标准化有助于拓展智能交通系统相关产品的供货渠道，创造更大的市场空间。在生产领域，标准的制定无疑能刺激生产的发展，使原来的生产厂商因更易于组织科研和生产而提高获利水平，这会吸引更多的厂商加入到产品供应行列，从而使得智能交通系统产品更加丰富，解决方案更多样化，服务功能更完善。缺乏标准的产品通常被局限在市场的某个狭小空间，难以占领国内和国际市场。

(3) 标准化有利于系统集成。智能交通系统是一项庞大的系统工程，其每项服务功能都不是单个设备所能完成的，接口设备的互联性对系统集成至关重要。标准化使得智能交通系统相关产品接口规范性好，互联性强，更易于系统集成，这对缩短工期，降低造价，提高系统的可靠性非常重要。

(4) 标准化有利于降低风险，加速智能交通系统产业化。标准化对产品的提供者和消费者都有好处。企业按照标准生产的产品不会由于接口不匹配的原因而受消费者冷落，消费者也不会因购买的产品不标准而无法在系统中使用。因此，标准化有利于减轻智能交通系统产品与服务的提供者和消费者的风险，促进智能交通系统的产业化进程。

总之，标准化是在全国和全球范围内提高智能交通系统兼容性的重要保证，有利于在局部和更大范围内建立更加可靠、稳定的智能交通系统。开放式的标准有利于促进智能交通系统产品和服务功能的竞争，其结果是最终使消费者获益。智能交通系统标准化能够开辟出更大的规范化产品市场，使生产者易于规模经营，从而降低成本和经营风险。

1.4.3 智能交通系统标准的类型

与其他领域的标准化一样，智能交通系统领域的标准也存在 3 种基本类型：强制性标准、事实性标准和推荐性标准。

(1) 强制性标准。强制性标准是由政府机构制定，用法律、行政手段强迫业界执行的标准，目的是保障公共福利和社会安全。这种强制性标准是保障智能交通系统顺利集成和在全国范围内兼容的重要保障，可以避免诸如 A 公司生产的数字地图光盘不能在 B 公司生产的汽车导航系统中工作等问题。

(2) 事实性标准。事实性标准通常是指由市场选择的标准。某个在市场占主导地位的生产企业或组织对某项智能交通系统技术或产品制定的有利于本企业的设计规范，由于其合理性和市场普遍性而被广泛接受并作为标准使用。

(3) 推荐性标准。推荐性标准是由具有共同利益的团体制定的有利于市场统一的标准，可以促进智能交通系统产品的生产者、系统集成商、服务提供商、消费者之间的协调一致性。

在智能交通系统中，三类标准都会涉及。智能交通系统结构框架的物理层中，很多领域需要制定强制性标准，以保障公共福利和公共利益；而在传输层中，许多通信技术都存在事实上的标准或推荐性的标准。

1.4.4 国际智能交通系统标准化

目前国际上与智能交通系统有关的标准化组织如图 1.7-5 所示。

图 1.7-5 中最主要的 ISO，IEC 和 ITU。ISO 于 2001 年 4 月在夏威夷召开的全体会议上，一致通过将 TC204（交通信息与控制技术委员会）的名称更改为“智能交通系统技术委员会”，全面负责智能交通系统领域的标准化工作。

其他与智能交通系统相关的 ISO 技术委员会包括：

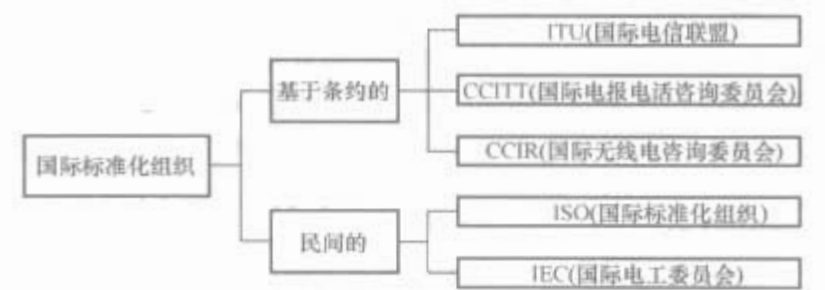


图 1.7-5 国际标准化组织分类图

ISO/INFCO：信息系统和服务技术委员会；

ISO/TC22：道路车辆技术委员会；

ISO/TC211：地理信息技术委员会；

ISO/IEC JTC1/SC31：信息技术/自动识别和数据获取技术委员会；

ISO/TC154：工商管理中的过程、数据资料 and 文件技术委员会。

ISO/TC204 工作组情况如表 1.7-6 所示。

表 1.7-6 ISO/TC204 工作组情况

工作组	工作组名称	主席国	备注
WG1	体系结构	英国	
WG2	质量和可靠性要求	美国	
WG3	数据库技术	日本	
WG4	车辆自动识别		合并到 WG1
WG5	收费	荷兰	
WG6	一般车队管理		合并到 WG7
WG7	商业车辆管理	加拿大	
WG8	公共交通/紧急事件管理	美国	
WG9	交通信息管理与控制	澳大利亚	
WG10	出行者信息系统	英国	
WG11	路线引导和导航系统	德国	
WG12	停车场管理		已停止工作
WG13	人的因素和人机接口		已停止工作
WG14	车辆/路面报警和控制系统	日本	
WG15	专用短程通信	德国	
WG16	广义通信/接口和协议	美国	

ISO/TC204 参加成员国分为 P 成员国和 O 成员国，即参加国和观察国。参加国应积极参加标准化工作，承担技术委员会所要求的对国际标准征求意见草案或最终的正式草案

投票义务，并参加会议。观察国不具有投票资格，可收到委员会文件并有权提出意见和参加会议。目前 TC204 的 P 成员国包括：澳大利亚、奥地利、中国、捷克共和国、丹麦、德国、爱尔兰、以色列、意大利、日本、韩国、马来西亚、荷兰、挪威、瑞典、英国和美国等。

ISO/TC204 与 ISO 的其他组织，如 TC22、TC211、IEC、ITU 及 APEC（亚太经济合作组织）等密切合作，共同促进智能交通系统的标准化工作。

1.5 智能交通系统应用的社会经济效益

智能交通系统的主要目标就是要充分有效地利用现有的交通资源，使其利用效率最大化。智能交通系统将从缓解交通拥挤、减少交通事故、降低交通环境影响以及提高生产效率等方面产生可观的社会经济效益。具体来说，智能交通系统的社会效益主要体现在如下几个方面。

1.5.1 减少交通拥挤和行车延误

随着城市人口的增加和社会经济活动的活跃，道路交通量不断增加，相应引起的交通拥挤也在增加。如前所述，不但在中国、泰国等发展中国家，就是在美国、日本、欧洲等发达国家，每年由于交通拥挤造成的经济损失也很大。智能交通系统的应用，将会大大缓解交通拥挤，节约交通利用者的出行时间，产生经济效益。

智能交通系统通过提供各种有选择的信息服务，能够使出行者的路径选择向网络均衡的系统最优方向接近，达到路网负荷的均匀化，再加上能够将交通事故迅速通报而使事故现场得到迅速清理的实时监测系统、能够根据当前情况调整的高速公路入口匝道和交通信号系统、能够减少收费站外车队长度的不停车收费系统等一系列智能交通系统子系统，可大大减少行车延误，实现道路资源的高效率使用。

1.5.2 减少交通事故的发生率、死亡率

根据美国的预测，到 2020 年，美国因交通事故造成的经济损失每年将超过 1500 亿美元，而采用智能交通系统将会提前预知危险和加快反应速度，从而大大增加交通的安全性，将事故损失降至最低。如在采用智能汽车—高速公路系统后，如果驾驶员比现在早 0.5s 预知危险，就可以减少追尾和交叉路口交通事故 50%、减少正面碰撞 30%；如果早 1s 预知危险，就可以回避 90% 的交通事故。另据统计可知，在交通事故中，20% 是立即死亡、59% 是现代医学无法医救的伤害、21% 是因得不到及时抢救而死亡的，因此，采用智能汽车—高速公路系统后因及时抢救，交通事故死亡率也将大大减少。

根据日本的计算，采用 ITS 后，2025 年交通事故将减少 50%，平均车速将提高 10km/h，交通堵塞现象完全消除，由此可以减少 56 亿 h/年的时间损失和 12.3 兆日元/年的经济损失，燃油消耗降低 25%，CO₂ 降低 15%，NO_x 降低 30%。

1.5.3 产业发展与就业机会的增加

智能交通系统涉及道路建设、交通管理、通信、计算机、电子、汽车、自动控制、信息服务、网络技术等众多领域，是具有巨大经济效益的未来新兴产业群，也是未来多媒体技术应用可能性最大的行业。同时，智能交通系统的技术发展与市场需求也将会推动与其相关产业的发展，增加就业岗位，促进社会经济的健康发展。

1.5.4 能源消耗量减少，污染程度降低

事实表明，单纯依靠交通基础设施建设解决交通问题，不但不能完全满足交通需求，还占用和消耗了大量的土地、

燃油等资源，并造成了汽车尾气排放量剧增，给环境带来了恶劣的影响。如美国人口不足世界人口的 5%，但能源消耗占了全世界总消耗的 30% 以上，其中交通运输所消耗的能源占了 1/4，而其中 95% 是石油。根据世界经济合作与发展组织 1988 年的计算，其成员国中交通运输产生的 CO₂ 排放量占总排放量的 21%，汽车尾气排放产生的大量硫化物、氮氧化物、碳氢化合物以及颗粒物所造成的地方性污染成本占 GNP 的 5%~10%。在未来，智能交通系统的大规模、大范围应用将明显改善这一状况，大大降低交通运输系统能源的消耗和对环境的污染。

表 1.7-7~表 1.7-10 所示为欧、美、日各国实施各种智能交通系统项目所产生的效益评价，分为安全效益、提高运输效率产生的效益、提高劳动生产率产生的效益和环境效益四个方面。当然，从表中数据可知，同样的系统在不同国家产生的效益有一定的差别，这也说明发展智能交通系统一定要从本国的国情出发，确定切合自己国家实际的智能交通系统发展战略和优先顺序。

表 1.7-7 安全效益

效益类别	技术种类	产生效益 (%)	实施国家及地区
交通事故减少的百分比	先进的信号控制	75~78	日本
	自适应信号控制	18	美国
		30	欧洲
	匝道控制	24~25	美国
	超速监视照相机	20~80	美国
		50	欧洲
	加以控制的汽车专用道	30	欧洲
	相撞报警	33~40	美国
	天气监测和可变信息板	30~40	欧洲
	紧急事件快速反应	7~12	欧洲
	动态路径诱导	1	美国
	事故与紧急事件管理	15	美国
救助时间减少的百分比	避免相撞系统	17	美国
	自动车辆定位/CAD	40	美国
	事故与紧急事件管理	20	美国
		43	欧洲

表 1.7-11 所示为欧洲、美国、日本智能交通系统应用效益的预测指标。由此可见，智能交通系统作为综合解决交通问题，保持经济、社会、生态可持续发展和环境相协调的新一代交通运输系统，其社会效益将是相当显著的。

表 1.7-8 效率效益

效益类别	技术种类	产生效益 (%)	实施国家及地区
旅行延误时间减少的百分比	匝道控制	13~48	美国
	匝道控制+VMS ^①	19	欧洲
	VMS	8	澳大利亚
	VMS 路径诱导	20	欧洲
	交通信号	8~25	美国
		10~20	日本
		20	澳大利亚
		12~48	欧洲

续表			
效益类别	技术种类	产生效益 (%)	实施国家及地区
旅行延误时间减少的百分比	事故管理	10~45	美国
		6~12	澳大利亚
	信号优先	5~8	美国
	车内导航	4~20	美国
	RDS/TMC ^②	3~9	欧洲
	需求管理 (进入控制)	18	欧洲
	城市交通控制	10	欧洲
	车队管理	5	欧洲
	电子收费	71	欧洲
		30	欧洲
	公交优先	7~19	欧洲
	集成的城市交通管理	25	欧洲
生产效率增加百分比	动态路径诱导	4~8	欧洲
		大约 15	日本
	高速路管理	17~25	美国
	匝道控制	8~22	美国
		3~5	欧洲
	电子收费	200~300	美国
	碰撞避免	6~30	美国

①VMS: 可变信息标志。
②RDS/TMC: 广播数据系统/交通信息通道。

表 1.7-9 生产率效益

效益类别	技术种类	产生效益 (%)	实施国家及地区
费用减少百分比	车队管理系统	5~25	美国
	自动车辆定位/CAD	4~9	美国
	驾驶员监护	40	欧洲
	公交 ITS 基础	8	美国
	电子收费	34~91	美国
时间浪费的减少百分比	CAD	37.5	欧洲
到达时间延误的减少	CAD	35	欧洲

表 1.7-10 环境效益

效益类别	技术种类	产生效益 (%)	实施国家及地区
尾气排放减少百分比	需求管理 (进入控制)	50	欧洲
	城市管理控制	26~30	欧洲
	车内路径诱导	5	欧洲
	信号优化	9.8~15.8	美国
	VMS 路径诱导	5~10	欧洲
	动态路径诱导	5~16	美国
	电子收费	45~83	美国
	电话路径选择诱导	1.5~33	美国

续表			
效益类别	技术种类	产生效益 (%)	实施国家及地区
燃料消耗百分比	电子收费	5	欧洲
	车队管理	4	欧洲
	车内导航	5	欧洲
	动态路径诱导	13	美国
	交通信号控制	4	欧洲
		6~13	美国
	高速公路管理	42	美国

表 1.7-11 欧洲、美国、日本智能交通系统应用效益预测指标

效益的表现	欧洲 (2017 年)	美国 (2015 年)	日本 (2020 年)
减少阻塞	出行时间减少 25%； 每车每年减少交费时间 40h； 公共交通延误减少 50%	出行时间减少 41%	拥挤时间减少 10%
能耗与环保	空气污染减少 25%	能源节约 6% 废气减少 6%	耗油减少 15%； CO ₂ 排放减少 15% 氮化物排放减少 30%
降低运输成本	营运成本减少 25%	营运成本减少 5%	—
新增市场商机	—	约 4300 亿美元	约 50000 亿日元 (3700 亿美元)

2 智能交通系统的主要组成部分

智能交通系统由一些子系统组成，这些子系统之间相互联系，相互渗透。各个国家智能交通系统的子系统组成各不相同。本节将对智能交通系统部分子系统的基本组成、工作原理和功能等做介绍。本节依次介绍先进交通信息系统 (Advanced Traveler Information System, ATIS)、先进交通管理系统 (Advanced Traffic Management System, ATMS)、先进车辆控制系统 (Advanced Vehicle Control System, AVCS)、先进公共交通系统 (Advanced Public Transportation Systems, APTS)、商用车辆运营系统 (Commercial Vehicle Operation Systems, CVOS) 和电子收费系统 (Electronic Toll Collection, ETC)。

2.1 先进交通信息系统

先进交通信息系统是在完善的信息网络基础上，交通参与者通过安装在车上、道路上、换乘站上、停车场以及气象中心等传感器和传输设备，向交通信息中心提供各处的交通信息；交通信息中心对信息进行处理后，通过各种信息装置，如可变信息板、调频广播台、车载装置、路侧通信设备、电子图文等媒体实时向交通参与者提供道路交通信息、公共交通信息、换乘信息、交通气象信息、停车场信息以及与出行相关的其他信息；出行者根据这些信息确定自己的出行方式、选择路线。概括地说，先进交通信息系统就是要收集相关交通信息，分析、传递、提供信息，为出行者在从起点到终点的出行过程中提供实时帮助，使整个出行过程舒适、方便、高效。

2.1.1 先进交通信息系统分类

根据信息流三要素：信息采集、信息处理与信息传送的集成程度及系统功能分配的不同，先进交通信息系统可分为

自动导航系统、单向通信系统和双向通信系统。

(1) 自动导航系统。自动导航系统集交通信息流三要素于一体，能对行驶中的车辆进行实时导航，如在车内显示包括目的地的地图，确定车辆位置等。它是在独立的车辆上装备有定位仪器和历史数据库的静态系统。车辆不与信息中心发生通信，而使用一个单独的记录着过去交通状况、路网信息的数据库。由于自动导航系统与交通信息中心无任何联系，独立运作，因此它不能提供基于当前状况的自动路线导航，不能向交通信息中心报告路段通行时间等。

(2) 单向通信系统。单向通信系统由交通信息中心和车载信息接收处理设备组成。交通信息中心将采集到的道路交通信息，进行处理后定时发送给各路段信号发射系统，在路网上各路段中行驶的车辆驾驶员借助车载信息接收装置，通过与信息处理机相联的显示设备获得当前交通阻塞地区和一般公路状况等信息，实时决定行驶路线。单向通信系统的致命弱点是交通信息中心仅单方面向道路使用者提供实时处理信息，却不能收到出行者反馈回来的信息利用结果，当信息中心通过监测系统采集到新的信息并发出时，拥挤可能已经发生了。单向通信系统较自动导航系统已有明显改进。

(3) 双向通信系统。双向通信系统在信息中心和出行者之间实行双向信息交换，以达到动态交通流分配、动态交通监控及实时交通预测的目的，是真正意义上的先进交通信息系统。该类系统的一个重要特性是使用装备了 ATIS 设备的车辆作为交通探测器。通过测量经过公路路段的通行时间，并借助车载无线电收发器发送此数据给交通信息控制中心，这样车辆就被用作交通探测器，从而车辆系统融合进公路系统，这也是 ITS 概念的核心。

2.1.2 先进交通信息系统的主要功能

先进交通信息系统是一种面向导航和定位跟踪的信息系统，它可以显示各种比例的电子地图，并将车载信息显示其上，能够迅速可靠地为车辆驾驶员提供各种信息查询，根据道路交通的实时情况采用最佳的路径选择法选择车辆道路交通网上的任意两点间的最佳行驶路线，并且结合全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 和无线集群系统有效地解决车辆定位导航、调度管理，实时为车辆驾驶员提供导航信息。该系统能够完成的主要功能包括：

(1) 电子地图显示功能。电子地图显示功能包括全屏显示、放大缩小、漫游、旋转、动态标记、分层显示等，可根据不同的用户需求制作各种专题图来进行空间检索和分析。另外，每个运行车辆都可以以特写的方式显示在信息中心的电子地图上，包括直接显示、选择显示或报警后显示。

(2) 标注当前车辆位置。实时接收移动车辆的 GPS 定位数据，转换地理坐标为屏幕坐标。由于 GPS 定位数据存在误差，可结合其他方式进行误差修正，例如可采用差分 GPS (DGPS) 定位与移动车辆的定位数据结合起来，计算出车辆的精确位置并将其标注在屏幕上。

(3) 地图查询功能。可点击屏幕上的图形查询属性信息，也可按照属性查询图形信息。

(4) 动态路径诱导。根据用户需求和实时交通信息，可对用户选择的任意两点间按照一定的路径搜索算法进行最佳路径搜索，找到一条从出发点到目的地的最佳路径来诱导出行，达到改善交通的目的，也可显示多种路径以供用户选择。

(5) 数据/话音通信。可在移动车辆与交通信息中心间进行数据或者话音通信，交通信息中心可对移动车辆进行单呼、组呼、群呼，发送短消息等功能，并且可与公用电话网

相连。

(6) 交通诱导功能。用户可登录 Web 网站查询电子地图，进行最佳路径选择，查询实时交通状况来达到交通诱导的目的；系统同时向路侧交通诱导显示牌发送当前交通状况信息或者其他与交通有关的宣传信息进行交通诱导。

2.1.3 先进交通信息系统的组成及功能

先进交通信息系统主要由车辆导航辅助系统 (Mobile Navigation Assistant system, MNAS) 或便携式导航辅助系统、交通信息中心 (Traffic Information Center, TIC) 和通信网络 (Communications Network, CN) 三大功能单元组成，系统的构成如图 1.7-6 所示。

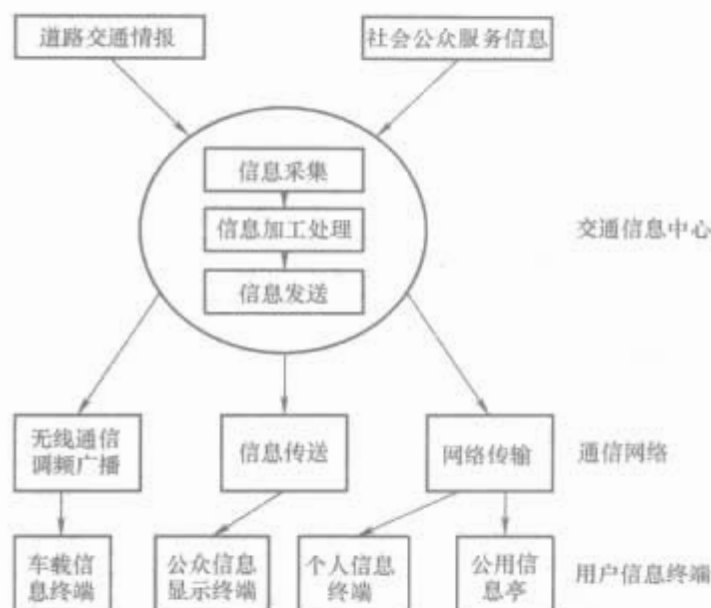


图 1.7-6 先进交通信息系统的系统构成图

车辆导航辅助系统——信息提供和路线导向的运作和显示，以及生成发送给交通信息中心的通行时间报告。

交通信息中心——为整个系统功能的实现提供数据处理、显示和接口功能，包括对道路交通运输数据和社会公众信息的采集、分类、加工和提供，以及其中涉及的最优路线搜索等。

通信网络——在用户信息终端和交通信息中心之间提供无线和有线的双向数据传输以及在信息源与信息中心之间的光纤数据传输。

2.1.4 先进交通信息系统的特点

(1) 实时性。先进交通信息系统与传统的信息服务系统的重要区别在于其信息的实时性。出行者需要的不是滞后的交通信息，他们需要获得实时的信息以便迅速作出出行决策，从而提高出行效率。

(2) 全面性。这里是指信息和途径的全面性。先进交通信息系统向出行者提供的是集公共交通的运营计划、道路条件信息、线路决策信息以及相关的交通和城市地理信息于一体的全面的交通信息；同时出行者可以通过电话、广播及 Internet 等媒体在家里、办公室、主要站点和公众场所等地便利地获取所需信息。

(3) 互联性。先进交通信息系统要求公共交通系统必须与城市交通信息实现良好的交互，公交信息只有与城市道路信息有良好的接口，才能有效地进行路线选择和运营决策。

(4) 高技术集成性。先进交通信息系统综合集成了 GPS、GIS 等先进的通信及计算机方面的高新技术，从而保证了信息系统的可靠性和高效性。

(5) 高效益性。先进交通信息系统的以上特点可以保证出行者便利地、及时地获得有关的交通信息，可以实现减少出行时间、提高出行效率、减少出行压力、便于乘客自由选

择等目的，最终提高交通系统的经济效益和社会效益。

2.2 先进交通管理系统

先进交通管理系统是一种利用先进交通信息采集、数据通信、电子控制和计算机处理等当代高新技术以及现代交通工程理论进行集成，实现对地区道路网络交通流进行实时监测、主动控制、协调管理与操作的综合交通管理系统。该系统的目的是最大限度地发挥交通网络的通行能力，达到缓解交通拥挤、缩短出行时间、降低能耗、减少交通事故，提高道路交通运行的效率。

2.2.1 先进交通管理系统特征

先进交通管理系统最主要的特征就是系统的高度集成化。它利用先进的通信、计算机、自动控制、视频监控技术，按照系统工程的原理进行系统集成，使得交通工程规划、交通信号控制、交通检测、交通电视监控、交通事故的救援及信息系统有机地结合起来，通过计算机网络系统，实现对交通的实时控制与指挥管理。先进交通管理系统的另一特征是信息高速集中与快速处理，先进交通管理系统由于运用了先进网络技术，获取信息快速、实时、准确，因而提高了控制的实时性，城市先进交通管理系统的应用使交通管理系统中交通参与者与道路以及车辆之间的关系变得更加和谐，缩短了旅行时间，使城市的交通变得更加有序。

2.2.2 先进交通管理系统功能

(1) 信息提供。先进交通管理系统通过各种信息提供系统向出行者提供信息服务，帮助出行者计划行程及出行时间，避免延误。

(2) 交通控制。对高速公路和道路网进行综合的自适应控制，优先考虑公众安全、公共交通或其他高乘载率的车辆，减少个人独自驱车出行的数量，并提供更多可供选择的出行方式。根据实时交通运输信息，确定车辆与行人通行在路网上的最佳分配，利用可变信息信号标志，对车辆进行诱导实现对交通流的动态分配。

(3) 交通事故处理。该系统可帮助运输部门和管理人员预测交通或道路状况，从而采取相应的预防措施，避免潜在隐患的发生或使其影响降至最低。系统还可迅速检测事故的发生并立即提供相应的交通控制措施，通过车载设备、可变情报板或路侧广播提供管理信息。

(4) 排放测试与污染防治。排放测试与污染防治采用先进汽车排放测试系统确定有关的环保“热点”，并在空气质量敏感地区采取道路改线或对进入该敏感地区的公路入口加以控制等措施。其他技术包括采用随车测试或路侧测试汽车尾气的排放，确定排放超标的车辆，并将有关信息提供给司机或车队管理人员，以便对排放水平超标车辆的进入加以控制，并采取相应的治理措施。本服务还将向运输规划和营运部门提供有关信息，便于实施和评价各种污染处理方案。

(5) 应急管理。应急管理可以提高对交通突发事件（事故或灾害）的报告和响应能力，改善应急响应资源配置，它包括紧急通告与应急车辆管理。紧急通告可为管理人员提供突发事件的初步信息，使管理人员迅速确认事故或灾害；应急车辆管理为公共安全机关提供车队管理、信号优先信息、路线导航。车队管理将提高确定事故发生方位的能力，帮助救援人员以最快的速度到达事故现场；路线导航将以信号优先技术确定最佳的行车路线，以引导应急车辆迅速到达事故现场。应急管理为警察、消防和医疗救护等应急部门服务。

(6) 自动收费。自动收费是为了提高收费站通行能力，使驾驶人员不停车，不用现金，进行自动付账，堵塞收费漏

洞。同时通过收费站可以收集大量交通数据并提供给交通控制中心。

(7) 提高养护操作效率。为保持安全、通畅、舒适的道路行车环境，提高服务水平，系统可对路面状况作出正确判断并对相应的养护作业提供工作计划和实施方案。在发生灾害时系统收集相关信息并指导相应的恢复工作。

(8) 特种车辆通行管理。特种车辆的管理用来保障路面结构正常使用，避免事故发生。系统在降低运营费用的同时改善了用户服务。系统包括：特种车辆通行许可的申请；业内工作的电子化处理；将通行路段信息存入数据库；将实际可通行路径信息提供给驾驶员等。系统还包括一个自动的不停车称重系统，以加快通行许可的确认过程。

2.2.3 先进交通管理系统的组成

先进的交通管理系统由一系列的监视公路状况、支持交通管理与提供出行建议的系统组成。典型的系统组成如图 1.7-7 所示。

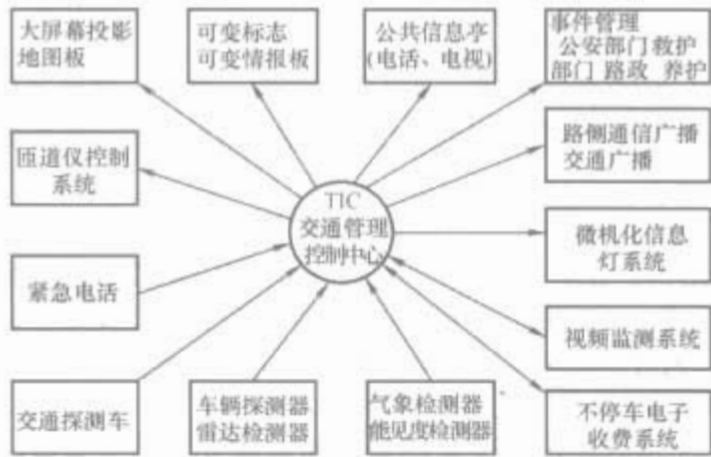


图 1.7-7 先进交通管理系统典型组成

2.2.3.1 从功能角度分析 ATMS 的体系结构

适应当前发展趋势的先进交通管理系统强调的概念是 (Integrated Traffic Control System, ITCS)，即集成化的交通控制系统。从功能角度分析，主要构成部分有：

(1) 先进车辆信息系统与车辆安全驾驶辅助系统 (Advanced Mobile Information Systems & Driving Safety Support Systems, AMIS & DSSS)，目的是利用交通系统中的基础设施为车载电子设备提供交通信息、为车辆安全驾驶提供帮助；

(2) 交通流控制系统与动态路径诱导系统 (Traffic Flow Control System & Dynamic Route Guidance Systems)，目的是通过交通信号灯来控制交通流量，使交通网络尽可能平稳高效地运行；动态路径诱导系统的目的之一是通过驾驶员路径选择行为的干预来谋求交通网络利用的最优；

(3) 行人信息和通信系统 (Pedestrian Information and Communication Systems, PICS)，目的是为道路上的行人尤其是残疾人以及其他有行动障碍的行人提供紧急服务；

(4) 紧急事件支持系统 (Support Systems for Emergency Event, SSEE)，目的是进行紧急事件发生时的自动处理和及时调度；

(5) 环境保护管理系统 (Environment Protection Management Systems, EPMS)，目的是监测交通网络中的环境参数并且通过控制与调度尽量减少由交通带来的环境污染公害；

(6) 电子收费系统，这是当前国内发展的热点之一，应用面很广，技术上趋于成熟，是智能交通系统的初步应用级领域。

随着智能交通系统研究与应用的深入，不仅先进交通管

理系统中的应用理论和技术正在不断进步,先进交通管理系统的内涵、外延和体系结构框架也在不断地发展。总体来看,其发展趋势是:集成更多功能子系统;内部集成更加紧密;对柔性和可扩展性的要求更高。

2.2.3.2 从信息流程角度划分系统组成

如果把整个先进交通管理系统按信息流程划分,则图1.7-7可简化为图1.7-8所示的四大部分。



图 1.7-8 先进交通管理系统信息流程图

(1) 信息采集系统的主要任务是实时采集路段、匝道口和收费口的交通参数、道路状况、气象参数等,然后通过信息传输系统,定时报送控制中心。图1.7-7所示的箭头指向交通控制中心的组件都包含在信息采集系统内,如车辆检测器、气象监测器等。

(2) 信息传输系统主要是通过光纤、电缆、微波等传输媒介,在终端与交通控制中心之间传输数据、语音和图像等信息。

(3) 信息处理系统(包括交通控制中心的各级计算机硬件与软件),主要对数据、语音、图像等信息进行处理和分析,生成并不断更新交通运输信息数据库,提出交通控制方案,并通过相应的设备对有关路段内的交通流做出相应的管理与调度。

(4) 信息提供系统是交通控制系统方案得以实施的工具,主要是向出行者或管理人员提供有关交通运输情报,主要调节交通流。图1.7-7中的箭头背向交通控制中心的组建都包含于信息提供系统中,如可变情报板、交通广播等。

2.2.4 先进交通管理系统的特点

和一般的交通管理系统比较,先进交通管理系统有以下特点。

(1) 车辆、道路和交通管理系统一体化。在先进交通管理系统中,许多车辆装备有车载传感器或车载导航器。车载传感器将提醒司机前方有路障或者在黑暗和大雾中提醒司机存在不安全的运行情况,而且它们的数据被直接传送到交通管理控制中心,从而提供了有关存在道路障碍或交通事故的实时信息。借助于先进的车辆检测器、视频监视装置、车载传感器以及先进的通信网络,交通管理控制中心能实时地掌握路网的交通流模式。为得到行驶路线的特定指引,司机通过车载导航器键入他们的当前位置和目的地,交通管理系统能够基于对当前交通流模式以及对车辆的目的地和计划路线的了解,提出相应的交通建议并传送给司机以最大限度地降低交通阻塞。

(2) 城市交通信号控制系统计算机网络化。城市交通信号控制系统已成功地运营了30多年。20世纪80年代以来,该类系统有明显的计算机网络化的趋势,使城市交通管理/控制方式发生了变革,实现了实时自适应信号控制。中央控制计算机对交通数据进行处理分析,并执行对路网交通信号的控制。它既不需要事先储存任何既定的配时方案,也不需要事先确定一套配时参数与交通量的对应选择关系。实时模拟系统依靠储存于中央计算机中的交通模型,对反馈回来的交通数据进行分析,从而对配时参数做优化调整。配时参数的优化是以综合目标函数,例如延迟时间、停车次数、拥挤程度及油耗等的预测值的最小化为依据。这种方法也已被应

用到公路的控制中。

(3) 在城市交通管制中应用人工智能技术。传统的城市交通管制系统只能通过交叉路口的信号控制缓解堵塞,计算机控制系统的优化目标是单一的某指标平均值的最大化或最小化。而智能交通系统的城市交通管理和控制期待的是多目标优化:消除堵塞,特别是非常规的堵塞;快速响应事故和突发事件;充分利用以往很难得到而现在可以得到的信息,更有效地控制城市交通和集成各种管理控制技术。为了得到满足这些目标的最优解,在先进交通管理系统中,用于城市交通管制的计算机系统出现了一些基于人工智能技术应用的体系结构,例如德国汉堡的交通管理系统。

(4) 信息采集和信息提供技术更加先进和多样化。城市街道和高速公路上的交通量、车道占有率、车速等作为交通管理和控制的基本依据的参数,是通过各类车辆检测器来测定的。以往主要使用的车辆检测器是埋设在路表的环形线圈检测器、磁性检测器和安装在交通要道的电视摄像机等。而现在,车辆检测器日趋系统化和光机电一体化,越来越多地使用更先进的超声波检测器、光检测器/红外检测器和各种视频监测系统。全天候的红外摄像机和性能优越的CCD摄像机已被广泛应用于交通管理系统。在高速公路管理中,过去广泛使用匝道仪控制入口匝道车流,而现在越来越多地使用可变信息标志VMS、CCDV摄像监视系统和Internet网络。在城市高速路的危险弯曲路段、视野不好的地方安装自动事故检测系统,这种系统依靠处理从视频摄像机获取的图像进行事故分析。

(5) 城市交通信号控制具有多种新功能。信号控制是交通管理的关键功能。ATMS的信号控制装置,通过与交通管理中心的计算机进行信息接收和发送,交替显示“绿灯”、“黄灯”和“红灯”。当接到来自车辆检测器或路侧按钮箱的信号时,还可延长或缩短绿灯信号时间。ITS中信号控制的新功能有:

1) 右(左)转弯感应控制:通过车辆检测器感知出交叉路口的右(左)转弯专用车道上的车辆,延长其右(左)转弯箭头信号的显示时间,可有效地对交叉路口的右(左)转弯车辆进行通行控制。

2) 公共交通感应控制:在交叉路口前面通过专用感知器件检测出公共汽车的存在,延长绿灯信号的显示时间,或缩短红灯信号的显示时间,可减少公共汽车等公交车辆的等待时间。通过此优先性控制信号功能,可确保公共汽车准点运行。

3) 踌躇感应控制:为避免进入交叉路口的车辆的司机在该区域里踌躇、犹豫不知该停车还是该开过去的情况,显示黄灯。由此可减少冲撞和迎头碰撞事故的发生。

4) 老弱病残专用控制:老年人、有视觉缺陷的人等交通方面的弱者可通过操作专用的按钮装置和随身携带的专用的信号发生器发出信号,将行人用的绿灯信号延长,以确保安全地横过马路。

2.3 先进车辆控制系统

先进车辆控制系统是指借助车载设备及路侧、路表的电子设备来检测周围行驶环境的变化情况,进行部分或完全的自动驾驶控制的系统,目的是提高行车安全和道路通行能力。该系统的本质就是将车辆/道路系统中的现代化的通信技术、控制技术和交通流理论加以集成,提供一个良好的辅助驾驶环境,在特定条件下,控制元件将取代驾驶员进行车辆的自动控制,使车辆安全行驶。

先进车辆控制系统是集成了传感器、计算机、车载控制系统以及车道控制系统的一个自动控制系统, 以提供预警、辅助驾驶或在危险行驶情况下自动干预等功能。它是智能交通系统中在技术上最难实现的最复杂的系统。

先进车辆控制系统强调的是行驶安全性。许多事故是由于前方车辆突然刹车或突然变换车道进入另一驾驶路线而该驾驶员困倦或注意力不集中所引起的。在这种情况下, 先进车辆控制系统具有自动刹车与预警功能, 将有效减少事故发生率。完善的先进车辆控制系统的另一个优点是车队控制技术, 一队车辆以较小的间距和均匀的速度在装有特殊设备的专用车道上行驶, 这样在不发生拥挤的情况下, 在相同的车道空间内, 可具有更高的车流密度和通行能力。

2.3.1 先进车辆控制系统的功能子系统

先进车辆控制系统的基本功能子系统包括: 安全预警系统、防撞系统、车道保持系统、视野扩展系统、巡视控制系统、紧急报警系统、车辆行驶自动导航系统和环保系统等。以下分别介绍。

(1) 安全预警系统。先进车辆控制系统的车辆安装的车载设备, 包括安装在车身各个部位的传感器、激光雷达、红外雷达、盲点探测器、超声波传感器、电波雷达等设施具有事故检测功能, 由计算机控制, 在超车、倒车、变换车道、雨天、大雾等容易发生事故的情况下, 随时以声音、图像等方式向驾驶员提供车辆周围及车辆本身的必要信息, 并可自动或半自动地进行车辆控制, 从而有效地防止事故的发生。

(2) 防撞系统。

1) 纵向防撞系统。纵向防撞系统主要是通过安装在车辆前后的雷达探测器或激光传感器等的探测作用实现的。利用传感器分别探测前后潜在的碰撞隐患或即将发生的碰撞事件, 为驾驶员提供及时的回避操作指令, 并自动控制车辆的加速减速控制系统以保持适当的车辆间距, 防止车辆与车辆、车辆和其他障碍物之间的正面或追尾碰撞。

2) 横向防撞系统。横向防撞系统主要是利用车辆左右两侧的传感器分别探测车辆两旁的情况, 从而为欲改变车道和驶离道路的车辆提供适当的侧向安全间距, 防止或减少两台或多台车辆发生碰撞, 或驶离道路的车辆与路侧障碍物发生碰撞。

3) 交叉口防撞系统。交叉口是碰撞事故的多发点。交叉口防撞系统主要是当车辆通过或者驶近信号控制的交叉口时, 将车载设备及通信系统获得的情报进行处理后, 判断出是否有发生事故的危險, 据此对车辆进行控制, 确保行车安全。

(3) 车道保持系统。车道保持系统的作用是为了防止车辆偏移。其目的是当驾驶员疏忽时, 保持汽车仍在控制下行驶。它采用警告系统告知驾驶员汽车正在偏移, 必要时, 启动自动控制装置自动控制转向。装有车道保持系统的汽车可以自动地沿道路行驶(在一些公路上), 而不用驾驶员操作。当汽车在其行驶车道中离开了它的路径时, 如果驾驶员不及时作出反应, 系统会自动使汽车回至原来的路线。

(4) 巡视控制系统。这一系统是在车道保持系统的基础上增加雷达。雷达不断测量本车与前车的距离, 并计算出两车的相对速度传给车上的计算机, 由计算机操纵节气门和制动装置, 从而与前车自动保持一个安全距离。这样, 汽车可以以较小的间距在车道上行驶。

(5) 视野扩展系统。视野扩展系统也称作视觉强化系统。车辆装有检测设备、屏幕显示设备及计算机处理设备, 对检测信息进行处理, 并以适当的、有助于驾驶员理解

的方式显示在屏幕上。这可以增强行驶环境的可视性, 对潜在信息、微弱信息(如在黄昏黑夜、大雾或雨天等环境造成难以看清的障碍物等)加强视觉可知性, 可大大提高车辆驾驶员对路况的观察及判断力, 使驾驶员更好地掌握交通状况, 从而提高汽车行驶的安全性。

(6) 紧急报警系统。紧急报警系统主要是在事故情况下缩短事故响应时间, 提高事故处理效率, 尽量减少事故损失。这个系统主要使用GPS技术和GSM通信技术及显示事故的电子地图等设备。当事故发生时, 碰撞传感器会自动发出一个由GPS确定的车辆位置的无线电信号, 由GSM技术完成车辆与反应中心的信息传输。反应中心的电子地图可以准确地显示出信号位置——事故发生的地点。

(7) 车辆行驶自动导航系统。目前, 各发达国家均大力开发汽车的导航系统, 这也是智能汽车的一个组成部分。它由GPS、GSM、电子地图、咨询诱导系统等组成。通过它寻找最佳行驶路线, 避开交通拥挤和发生事故的路段。驾驶员可以将目的地输入车内的电脑, 提出要求, 电脑便根据道路情况、红绿灯数、速度限制等, 选出最佳路段, 并显示在电子地图上。它不仅使车辆避开拥堵阻塞的路线, 还可以帮助疏散车辆, 减轻驾驶人员心理负担, 提供安全、舒适的行车环境。

(8) 环保系统。环保系统主要是由计算机检测控制燃油、排放等情况, 以取得最佳排放效果。智能汽车环保系统的研制与开发, 是先进车辆控制系统研究开发的重要领域, 可以减少排放及噪声污染, 提高汽车的运行效率。

2.3.2 先进车辆控制系统的结构

一个完善的先进车辆控制系统主要由智能车、智能车与道路之间的通信系统以及智能车与智能车之间的通信系统组成。从当前的发展看, 先进车辆控制系统可以分为以下两个层次:

(1) 车辆辅助安全驾驶系统。该系统有以下几个部分: 车载传感器(微波雷达、激光雷达、摄像机、其他形式的传感器等)、车载计算机和控制执行机构等。行驶中的车辆通过车载的传感器测定出与前车、周围车辆以及与道路设施的距离和其他情况, 车载计算机进行处理, 对驾驶员提出警告, 在紧急情况下, 强制车辆制动。

(2) 自动驾驶系统。装备了这种系统的汽车也称为智能汽车, 它在行驶中可以做到自动导向, 自动检测和回避障碍物, 在智能公路上, 能够在较高的速度下自动保持与前车的距离。必须指出, 智能汽车在智能公路上使用才能发挥出全部功能, 如果在普通公路上使用, 它仅仅是一辆装备了辅助安全驾驶系统的汽车。

先进车辆控制系统的智能控制作用主要通过利用智能车的智能控制系统处理所提供的道路交通等信息而实现。其关键部分为智能车辆部分, 智能车辆的结构示意图如图1.7-9所示。

先进车辆系统就是专用车道与先进的汽车的完整结合。其工作原理可以由图1.7-10所示的车辆控制示意图表示。

先进车辆控制系统的进一步发展将是由专用车道和智能车辆之间有机结合起来的一个综合运行系统, 也就是车辆自动驾驶系统。

车辆自动驾驶系统主要是应用现代化的传感技术、通信技术、计算机技术以及检测技术等装备车辆及公路系统, 并通过车—路通信和车—车通信, 达到车辆可以自动控制方向、速度、车间距等, 从而使汽车自动行驶在智能化公路上。自动驾驶系统的本质就是使公路系统具有一定的智能,

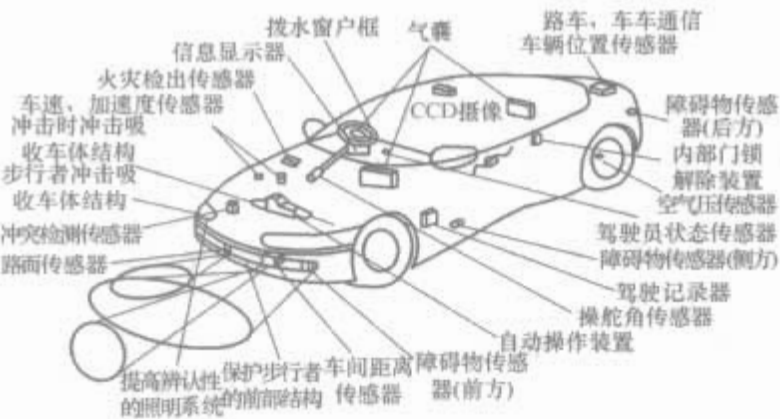


图 1.7-9 智能车辆结构示意图

并依靠车辆的智能系统控制车辆的自动驾驶，将交通流调整到最佳状态，从而减少因人工驾驶而引起的交通问题，提高公路系统的安全性和运行效率。

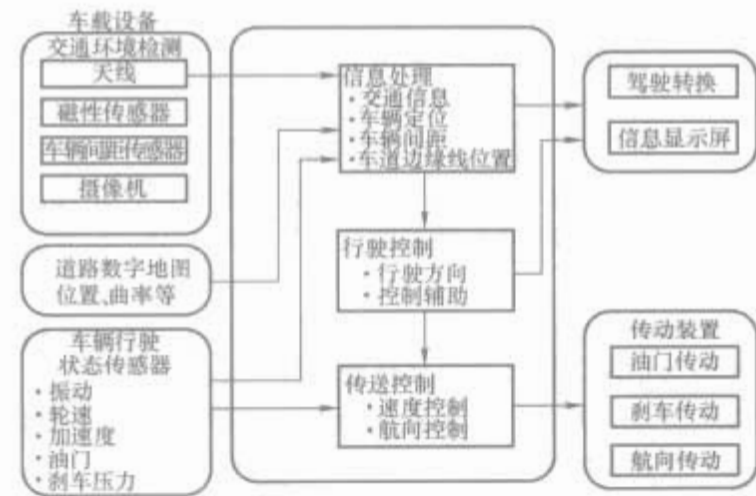


图 1.7-10 智能车辆控制示意图

2.4 先进公共运输系统

先进公共运输系统作为现代城市交通研究的一个主要发展方向，将先进的信息技术、传感器技术、自动控制理论、运筹学、人工智能等有效而综合地运用于城市公交指挥调度、公交运营管理、综合业务通信、乘客信息系统、动态信息发布、远程图文信息发布、网上交通信息查询、多媒体数据传输等系统之上，通过动态采集公共交通信息，提供交通信息服务，提高公共交通的吸引力。

2.4.1 先进公共运输系统的研究内容

一般来说，先进公共运输系统建设主要围绕以下三方面内容：

(1) 建立高效的公交运营管理组织模式。公交是客运服务企业，运营组织效率的提高，不仅关系到公交自身的问题，还直接与乘客息息相关，是社会问题。因此，合理、优化的运营管理组织模式既为公交带来效益，更为乘客出行带来优质服务。这是智能交通系统在公交运营上的主要体现，也是先进公共运输系统的重要组成部分。

(2) 快速、灵活的调度指挥系统。借助监控定位系统得到的信息，通过辅助调度系统提供的预案支持，提高调度员的处理能力。特别是处理需要公交脱线运营的突发事件、异常情况或有组织的重大活动的的能力大大加强。

(3) 完善的乘客信息服务。借助先进的定位通信系统和地理信息系统，发布线路及车辆运行信息，为乘客出行提供全方位的信息。

2.4.2 先进公共运输系统的用户服务功能构成

先进公共运输系统的用户服务可以归纳为四个主要功能子系统：

(1) 公共运输辅助管理系统。公共运输辅助管理系统是利用计算机技术对公交车辆及公共设施的技术状况和服务水平进行实时分析，实现公交系统规划、运营及管理功能的自动化。通过实时分析可发现实际运行情况与行车计划的偏差及原因，并为调度人员和驾驶员提供各种可能的解决方案，从而有助于车辆的准点运行、协调交通服务的提供，加强突发事件的管理等。与先进交通管理系统相结合，采取公交优先等策略，可以推动公交利用率的增长，可以确保多方式联运中出行者中转换乘的便利。此外，客运量、客运周转量、车辆运行时间和累计里程等信息有助于提高服务质量。而运行信息的自动记录功能以及任务完成情况检查功能可以强化公交系统的行政管理力度。

(2) 公共运输信息系统。该服务可为利用公共运输方式的出行者提供实时准确的车载中转换乘服务信息，帮助出行者在途中根据需要做出合适的换乘决定并调整行程计划。该系统将使决策的做出更加便捷。它使用各种媒体包括电话、监控器、有线电视、可变信息标志、公共电话以及个人电脑，提供各种运输方式的信息。公共运输信息系统，尤其是专门为运输部门设计的，开始与自动车辆定位联系起来以提供实时信息，例如到达时间、出发时间以及延误等。

(3) 满足个人需要的非定线或准定线公共运输。非定线公共运输指国营或私营的小型合乘车辆可根据用户需要接送乘客。另一种可以改善服务的方案是准定线的公共运输车辆可驶离固定线路一定的距离，以方便乘客上下车。这类公共运输车辆可以是小公共汽车、出租车或其他小型可合乘的车辆。由于该项服务方便快捷，在人口密度较小路段及其相邻地区可扩大公共交通运输服务的覆盖面。

(4) 公共运输安全系统。该项服务可以为公共汽车站、停车场、客运站及行驶途中的公共汽车或合乘车辆提供行驶或工作环境安全监测，及时预警并在必要时自动控制直到危险解除，从而提高了公交司乘人员的安全系数。

2.4.3 先进公共运输系统的工作原理

先进公共运输系统组成原理如图 1.7-11 所示。

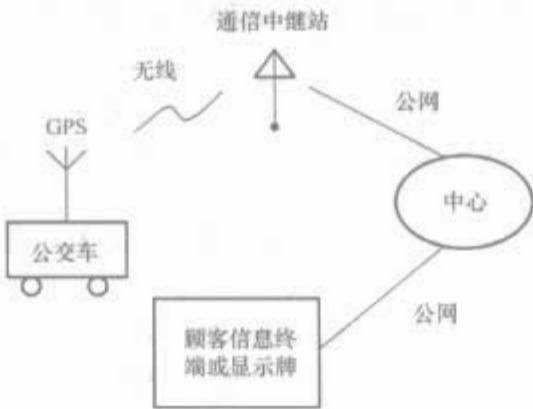


图 1.7-11 先进公共运输系统原理框图

先进公共运输系统可以具体描述为：采用 GPS 进行数据采集，结合公交出行调查，以 GIS 为操作平台，在对公交线网布局、线路公交方式配置、站点布置、发车间隔确定、票价的制定等进行优化和设计的基础上，实现公交车辆的自动调度和指挥，保证车辆的准点运行，并使出行者能够通过电子站牌了解车辆的到达时刻，从而节约乘客的出行时间。同时，公交出行者可以通过媒体（如可变信息牌、信息台、电话、互联网等）方便地获得公交信息（如出行线路、换乘点、票价、车型等），使更多出行者采用公交出行方式。最后，对智能公交系统的社会效益、经济效益和服务水平进行评价。

2.5 商用车辆运营系统

2.5.1 商用车辆运营系统概述

商用车辆运营系统通过纸上作业自动化、增强运输企业的生产能力、提高装备与设施的使用效率等措施来减少管理者与承运人的开销；通过新技术的应用，更好地执行载重规定等运输规章，减少基础设施的维护保养和更新费用；通过商用车辆的智能化，改进其运输安全性和运营效率。

商用车辆运营的许多新技术与智能交通系统其他领域的技术有所不同，如电子数据交换、自动车辆识别、移动车辆称重、危险货物事故响应和货车连续自动驾驶等，这些都是商用车辆运营中广泛应用的特殊技术。

2.5.2 商用车辆运营系统的用户服务功能

商用车辆包括货运汽车、公共汽车、出租车和紧急车辆。商用车辆运营系统可为商用车辆运营用户提供电子通关；对高速行驶中的车辆、货物状态和司机的安全情况进行监测、危险时预警并在必要时进行自动控制；对运送危险品的车辆，在发生事故时，能立刻确定事故的严重程度、事故地点、危险品种类并推荐最佳应急方案；还可帮助司机确定车辆位置，避开交通阻塞路段，大大提高运输效率。

商用车辆运营服务涉及商用车辆的运营生产管理、安全性能管理等多个方面。通过提供商用车辆运营服务可以简化如注册情况、车辆技术性能、轴荷、尺寸等检查的手续，优化配送计划，提高管理效率，达到减少延误、提高运输生产效率的目的。此外，商用车辆运营服务所提供的有效检查、监控等现代管理手段，可以提高商用车辆运营的安全度。商用车辆运营用户服务可以包括以下6项：

(1) 商用车辆电子通关。装备脉冲应答器的载货汽车可以在高速行驶的状态下，在关卡由先进的电子设备检测其注册情况、安全状况及重量等。注册合法、性能安全的车辆将在不停车的情况下迅速通过检查关卡或货车称重设施，简化了国内国际关卡的通关手续、最大限度地减少了滞留。

(2) 商用车辆管理。商用车辆管理这一服务使运输公司管理人员可用电子方式办理注册手续，得到通关证件，并获得购买燃料数与行驶里程数及相关税费等信息。这既减轻了政府管理部门的负担，也缩短了运输公司的手续办理时间，提高了管理部门及被管理对象双方的工作效率，同时可大大降低运输公司收集上报所需的里程和燃料数据的费用，极大地减轻运输公司的管理负担。

(3) 车载安全监控。对高速行驶中的车辆、货物状态及驾驶员的安全情况进行监测，危险时预警并在必要时进行自动控制。车载安全监控包括对轮胎、制动系统、车灯等车辆关键部件的性能进行检测和诊断，对装载的货物在运输中发生错位、滑移等不安全因素的检测；采用适当的技术对连续行车时间及驾驶员的注意力集中程度进行检测，同时还为驾驶员、交通管理人员提供各种警报系统，并将结果报告给司机、运输公司管理人员及有关的执法人员。

(4) 危险货物事故响应。在运送危险品的车辆发生事故时，能立刻确定事故的严重程度、事故地点以及提供及时、准确的危险品种类等信息，并推荐最佳应急方案，以便对事故进行适当的处理，提供响应指令与紧急救援响应电话号码等，从而提高危险品运输的安全性。

(5) 商用车队管理。商用车队管理这一服务为司机、调度与多式联运者提供通信链路，为运输者编制可行的计划和车辆行程时刻表提供实时信息，包括货物配送、回程装载、路径诱导等信息。最终实现商用车辆自动列队驾驶。

(6) 自动路旁安全检查。自动路旁安全检查这一系统把电子通关系统提供的安全数据与其他技术结合起来，检查车辆安全性以及司机的反应能力与适应能力。

2.5.3 重车自动识别

为了保证运输安全和防止超重车辆毁坏公路，各国都以法规的形式对重车的规模和载重量进行了限制。为了执法，在高等级公路、高速公路上需要设置一定数量的称重站。以往，重车到达称重站或检查站时，要停车接受检查，由人工测定尺寸或由磅秤测定重量，这是静态称重。和停车收费一样，停车接受检查和静态称重会降低运输效率、引起交通堵塞、增加运输时间、加剧废气污染。因此，不停车通过检查站和称重站，实现移动车辆称重是很有意义的。

2.6 电子收费系统

电子收费系统亦称为不停车（电子）收费系统，是电子技术、计算机技术、激光应用技术以及通信技术的产物。安装在车辆挡风玻璃上的电子标识卡（存储与车辆收费有关的信息，如预缴金额、车辆型号、车牌号码、车主的有关资料等）与安装在收费车道旁的读写收发器，通过微波或红外线进行快速的数据交换，系统按相应的标准计算金额，通过联网的银行或提前预缴的储值卡进行结算，实现车辆的不停车收费。

2.6.1 收费系统的分类

目前对收费系统的分类方法主要有两种，即按收费制式和按收费方式来分。

2.6.1.1 按收费制式的分类

按收费制式分类，收费系统可以分为以下几类：

(1) 全线均等收费制。全线均等收费制简称均一制，是最简单的一种收费制式，在这种收费制式下收费站一般设置在收费道路的各个入口处，这样，每辆车只需在进入收费道路时交一次费，然后就可以自由行驶，不再受阻拦。均一制的收费标准仅取决于车型一个因素，与行驶里程无关，而且一般每个收费站都采取同一收费标准。

(2) 路段均等收费制。路段均等收费制又称开放式收费系统或栅栏式收费系统，这种收费系统的收费站建在收费道路的主线上，距离较长的收费道路可以建多个收费站，在各个人出口不再设站，车辆可以自由进出而不受控制，收费道路对外界呈“开放”状态。每个收费站的收费标准和均一制一样仅取决于车型因素，但各站的标准则可能因控制距离不等而有所区别。而且长途车辆可能经过多个收费站而多次交费，这样也大致体现了依据行驶距离决定收费金额的原则。

(3) 互通立交区段收费制。互通立交区段收费制又称封闭式收费系统，该收费制式下的收费站建在各互通立交出入匝道上，也可建在主线上。车辆进出收费道路都要经过收费站并受控制，但在道路内部则可以自由行驶，整个道路对外界呈“封闭”状态。车辆驶入收费道路时，通过收费站的入口车道时，领取一张通行券，上面记录着该收费站的名称、编号或有关车辆本身的信息。而当车辆驶离收费道路，通过收费站的出口车道时，交回通行券，收费人员或设施将依此判断车型和车辆的行驶里程，并根据这两个因素计价收费。这样，车辆行驶下来需停车两次，交费一次。很显然，每个收费站的收费标准将是多种多样的。

(4) 混合制收费制式。由上可见，对于短途公路收费，均一制是比较合适的，而对于中长距离的收费公路，三种经典收费制式虽然可用，但均存在着一定的不足。为此，提出了一种新型收费制式——混合收费制，并在工程中逐步得到

应用和完善。所谓混合式收费制，是均一制和开放式的混合形式，其基本出发点是将两者的优点结合起来，形成一种新型的、简单有效的收费制式，用于中长距离的收费公路。混合式回避了三种经典收费制式的缺陷，表现出很多优越性，如不会漏收、较公平合理、可适应分段收费的要求，同时收费广场数量相当或有所减少，收费车道数大幅减少，总运营成本降低，对交通的总体影响也较小。另外，它还表现出很大的灵活性，与其他收费制式综合使用，可达到最佳收费效果。

2.6.1.2 按收费方式的分类

收费系统按收费方式和自动化程度大致可以分为三类收费系统：人工收费系统、半自动收费系统及全自动收费系统。

(1) 人工收费系统。人工收费系统采用人工收费方式，这种方式在每个收费车道的收费亭内设置收费员，对通过收费站的车辆进行车型识别，收取通行费，发放收据后给予车辆放行，这些收费操作全部由收费员手工完成，基本上不使用计算机；同时收费采用现金交易，收据一般也预先印刷好，对每一收费员收费的结算最后也参考所发出的收据量进行。人工收费系统的特点是节省投资、操作简单，目前还有许多收费站点采用，但是容易出现漏收、逃费和收费员的贪污违纪现象，并且收费处理的效率也比较低。

(2) 半自动收费系统。所谓半自动收费系统是由人工和计算机来共同完成收费工作的收费系统。它一般由人工（或仪器）识别车型，人工收费，但由计算机进行计费、数据打印和汇总结算等，收费站可以通过计算机网络对所有收费车道进行统一管理，同时在一定区域内还可以实行联网收费和管理。

1) 人工收费、人工判断车型、车辆检测器计数、电视监视、计算机管理。这是目前比较流行的收费方式。在收费站配备计算机系统，收费车道配备车道控制计算机、电动栏杆、车辆计数器、费额显示器等设备对收费过程进行管理，并配备闭路电视监视系统对收费过程进行监控。在这种方式下，人工负责收钱、找零，处理各种特殊情况和判断车型；计算机管理的收费机负责车辆计数，对收费操作进行准确的分类统计；闭路电视系统则可以通过真实显现和记录通过车辆的车型以及处理情况，使系统监督的功能进一步加强。

2) 人工收费、自动车辆分型、车辆检测器计数、计算机管理、辅以电视监视。在收费车道的入口处安装车辆分型设备（或车辆称重设备），信息自动送到车道控制计算机，收费员据此发卡。有些高速公路将自动分型设备安装在车道的出口端，此时分型设备仅起校核监督作用，检验收费人员判型是否正确。使用情况表明，仅起校核作用的设备，其作用往往是有限的。半自动收费方式被称为“人工收费，计算机管理”，它兼顾人工和计算机所长，又避二者之短，目前为世界各国广泛采用。目前我国的很多收费系统在此基础上还增加了闭路电视监控系统，形成独具特色的“人工收费，计算机管理，电视监控”的收费模式，使这一收费方式更趋严密和成熟。它能避免漏收和逃费现象的发生，对逃费现象也可进行有效的事后处理；另外，计算机的统计和管理功能对收费操作员能起到很好的稽查和监督作用。半自动收费系统由于采用人工收费交易（一般还要加上车型判断），因而其处理效率仍然较低。

(3) 自动收费系统。自动收费系统又分为（全）自动机械收费系统和（全）自动电子收费系统/（全）电子收费系统。

1) 全自动机械收费系统。全自动机械收费系统有投币式和票卡式两种。全自动机械收费系统在欧美国家曾一度风行，其最大优点在于自动化程度高，节省收费人员。缺点是设备复杂，初期投入和运营维护费用昂贵；另外要求司机必须携带大量硬币或票卡，使用范围有一定限制。全自动机械收费系统目前仅在辅助性场合或大型收费广场开辟若干车道供特定车型（多为小客车）使用。

2) 全自动电子收费系统。如前所述，全自动电子收费系统/电子收费系统也称为不停车（电子）收费系统，它在传统收费的基础上广泛采用现代高新技术，尤其是电子和通信技术，在车辆运动的情况下，通过无线通信技术使安装于车辆上的某种专用设备（又称车载单元）和设置在收费车道或路侧的装置（又称路侧单元）之间进行信息交换，并在此过程中自动完成收费操作。它在收费过程中流通的是电子货币，而不再是传统的纸币现金。一般情况下，实现道路的不停车收费，车辆只需要按照一定速度要求直接驶过系统的收费道口，收费过程就可以通过无线通信和机器设备的操作自动完成，从而大大提高了收费的效率。

2.6.2 电子收费系统的特点

电子收费系统最大的特点就是“不停车”，即车辆以一定速度通过收费口，一切收费操作均由电子设备完成，它具有如下功能和优点：

(1) 迅速完成对道路使用者的收费，减少车辆因交费而产生的交通延误和拥堵。

(2) 规避了人员收费可能造成的失误和违规操作，收费的效率和准确性大大提高。

(3) 降低了收费成本和因收费而消耗的社会费用，因为采用电子化系统不仅节省了人工费用，简化了财务手续，有利于防止收费人员作弊贪污，而且审计、管理费用也可降低。另一方面，随着这项技术的发展，未来的道路上将不再需要建设传统意义上的收费站，可以省去大量的土建工程和费用。

(4) 减少能耗，有利环保。车辆不会因收费而加减速和停车等待，因此可减少能源的消耗和尾气排放量及由此带来的环境污染。

(5) 收费和道路管理相结合。设置的路侧系统能使道路管理者同时准确、实时地了解道路运行状况，及时发现交通事故，并可做到实时调查和交通监视，采取一些交通管理和控制措施；通过实施道路拥挤收费可以鼓励司机在非高峰时段使用道路。

2.6.3 电子收费系统的基本原理

电子收费系统的基本原理，是使安装在车辆上的车载装置（车上单元）通过无线通信与安装在收费口上的天线进行信息交换，根据车载装置中保存的与收费相关的数据，即时计算并征收通行费用。费用征收一般不用现金方式，而使用电子记账式系统（如 IC 卡）或银行账户式收费。

电子收费系统用户的缴费方式有两种：一是预先支付，另一种是事后支付。在具体实现上，两种缴费方式都有集中式和非集中式两种管理方法。在集中式的管理方法中，预先支付方式的预付款余额或事后支付方式的记账结算情况都保存在系统的专门中心计算机中，用户只拥有一个起索引作用的编号（这个编号一般就是用户的账号）。在非集中式的方法中，预付款余额或账号记账结算情况都直接保存在用户单元上。

电子收费系统的基本运行过程是：首先用户前往收费管理部门，申请安装车上单元，预缴通行费或设立事后付费账

户，将相应信息被存入车上单元中，然后该车辆便可以上路行驶了。进入收费站时，车辆以规定限速通过电子收费车道。识别子系统识别出该车辆所属的类型，报告控制单元。通信子系统通过天线与车上单元进行通信，完成收费操作。收费操作的具体步骤包括根据车型按照收费规则确定收费额，核对余额、账号信息、选择相应操作等。如果一切无误（余额充足或账号有效），则正常结束收费操作（改写余额或记账）；否则，控制单元将启动强制子系统，拦下不正常缴费的车辆或记录其车牌号码等，以便进行事后追缴。收费操作通常由路侧收费装置中的控制单元负责，在一定条件下也可以由车上单元完成。

每次收费操作完成后，收费的相关信息都将递交给收费站计算机，收费站中心计算机对其按不同类别进行分类处理。正常收费信息可以积累汇总，产生相应的收入报告；事后付款方式的收费数据则将定时（或立即）传送给中央处理系统，以便生成转账清单向金融机构请求支付；违规车辆的信息将立即传递到中央处理系统，以确保统一及时处理。在自动收费系统中，金融机构也是重要的参与者，它负责提供金融服务，包括管理各类账户，处理转账、清账事务等，还可参与车上单元的发行。同时，它要向系统定期提供不良信用账号的“黑名单”以及业务结算报告等信息。

2.6.4 电子收费系统的构成

从上述电子收费的收费原理和收费的一般过程可以看出，电子收费系统主要包括以下几个方面的技术要素：车载单元系统；路侧收费与控制系统；车载系统与路侧系统间通信；中心管理系统；路侧系统与中心的通信；账户系统和监测系统。各要素之间关系如图 1.7-12 所示。

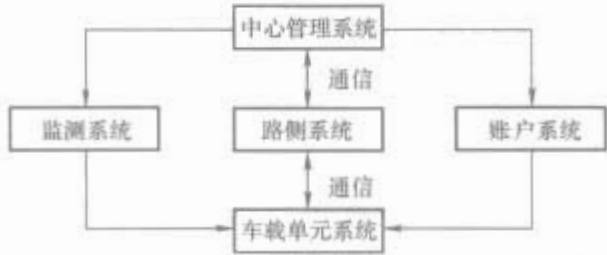


图 1.7-12 自动收费系统构成要素及关系图

车载单元系统指安装在运动车辆上带有车辆信息且能与路侧系统间实现通信的装置，一般包括车载机和用户标记卡或仅有标记卡；路侧系统主要指与车载单元通信的带辅助天线的路侧阅读器及本地操作控制器，它是完成收费与控制操作的核心部件；中心管理系统对整个收费进行操作、管理和监视；账户系统负责收费业务的存储和账户结算；监测系统则判断收费操作是否正常进行，并对违章或无效车辆进行图像捕捉和拍摄记录，为后续处理提供依据；车载单元与路侧间的通信是无线通信，而路侧系统与管理中心间的通信一般是有线通信。

(1) 车载单元系统。车载单元是用户的电子钱包，其中存储了用户账号（或余额）、行驶情况等收费相关信息；同时它还具有通信功能和人机交互功能。车载单元的工作过程有三部：信息发送、信息接收和用户操作。其中前两步由车上单元自动执行，而第三步（主要是信息查询）则在用户的参与下进行。

(2) 路侧系统。在电子收费系统中，路侧系统含有收费的控制单元，主要负责完成车道的收费操作。控制单元的功能可以划分为两个部分：一部分是电子化收费，如费额计算、路—车通信控制等；另一部分主要是车道控制与管理，

包括车型识别、信号灯控制、放行控制等。电子收费系统中的车型识别是自动完成的，这需要借助自动车辆分类、自动车辆识别等技术。这些技术大多通过探测分析车辆的某些特征来确定车辆的类型。常见的车辆自动识别方法包括根据车辆外形进行识别的轮廓扫描（使用无线电波、红外线或激光），车轴计数（传感或非接触探测），以及基于图像处理与识别的号牌自动识别。

(3) 中心管理系统。中心管理系统包括收费站计算机和中央处理系统两部分。收费站计算机负责管理收费站，这种管理主要有两个方面：一方面是对站上硬件设施的管理，包括道口开闭、设备状态监视等；另一方面是对收费的管理，包括实时记录收费操作、定期结算等。中央处理系统是处于收费管理机构一级的管理系统。它负责处理收费系统中全局性的事务和事件，如管理下属收费站、处理非法使用者、财务、用户管理等。它还负责与金融部门等外界其他系统的联系。收费站计算机与中央处理系统之间通过通信网络相互联系。该网络一般是专用、高速、大容量的。目前，通常采用以光纤为传输介质的通信网。

(4) 账户系统。由于电子收费系统采用电子货币交易，不管是预先支付，还是事后支付，交易都须借助一定的账户来完成和结算。为操作方便，这种账户系统一般采取和金融部门共建的形式，并最后由收费站统一和银行间进行结算。账户系统对每一用户的收费业务进行存储和管理，并最终提供收费站或区域收费中心与银行之间的统计核算。每个账户都由唯一的标记卡或车载单元来实现。

(5) 监测系统。监测系统用于处理非法使用电子收费系统的违规车辆。最基本的处理方法是在车道上设置栏杆，拦下不正常缴费的车辆。更常用的手段是对违规车辆拍照或摄像，将得到的模拟或数字图像通过通信网络递交有关机构，进行辨认、处理。拍摄的内容通常是车辆的前、后号牌，更完善的还包括驾驶员的图像，以用于后续追缴和处罚的证据。一些收费系统还对收费系统操作本身进行监视，以保证收费正常进行。

(6) 通信系统。通信子系统是电子收费系统中的重点，负责实现车上单元与站上收费设备之间的信息交换。

3 车辆定位导航系统及其定位技术

3.1 概述

车辆定位导航系统是智能交通系统中一个重要的组成部分，它给出行者和管理者提供所需要的交通信息。在智能交通系统中，大多数子系统都与车辆管理、定位和导航有关。自 20 世纪 60 年代以来，世界各发达国家就开展了对车辆定位与导航方法的研究，经过近半个世纪的研究和新技术的应用，车辆定位与导航技术已经达到了一个崭新的高度。20 世纪 60 年代末期，美国公路联邦局提出了电子路径引导系统，其试验系统获得了极大成功，但最终因资金限制而未能实现。20 世纪 70 年代，类似的系统分别在日本和德国进行了试验。美国在开发电子路径引导系统的同时又开发了一种自动路径导航系统，它利用航位推算（Dead Reckoning, DR）技术和地图匹配（Map Matching, MM）算法进行定位，一旦确定车辆在行驶路径中的位置就产生引导指令并显示在车载显示器上。20 世纪 80 年代中期，一种称为 Navigation 的汽车自动导航系统在市场上出现，它配有电子地图数据库，采用 DR 和 MM 技术，能够将车辆当前的位置直接显示在电子地图上。但此时的定位与导航产品仍然有许

多缺点，且价格昂贵，无法获得广泛的应用。20 世纪 90 年代后，随着计算机和通信技术的飞速发展，特别是全球定位系统 GPS 的建立，车辆定位与导航系统进入了真正的实用阶段。1994 年，第一部装有 GPS 接收机的自动导航系统 Guidestar 投入市场。与此同时，定位与导航系统的概念和相关研究范围也开始扩展，从单一的车辆定位和导航发展到能够进行道路和车辆双向信息交换的智能车辆/道路系统。

3.2 车辆定位导航系统的组成

3.2.1 车辆定位导航系统的功能

车辆定位导航系统是应用车辆自动定位技术、地理信息系统技术、计算机技术、多媒体技术和现代通信技术的高科技综合系统，它能为车辆驾驶员提供以下重要功能：

- (1) 自动车辆定位。系统可在出行时准确、实时地确定出车辆的当前位置，并以图形化方式显示在电子地图中。
- (2) 路径规划。系统可根据驾驶员提供的起点、终点，自动规划出旅行代价最少的最优行驶路线。
- (3) 路径引导。系统可在出行过程中产生语音或图形方式的引导指令，帮助驾驶员沿预定行车路线顺利抵达目的地。
- (4) 综合信息服务。系统可向用户提供与电子地图有关的信息检索与查询服务，如按用户要求显示停车场、主要旅游景点、宾馆饭店等服务设施位置的数据资料，并在电子地图上指示出其所处的位置。

(5) 无线通信。系统可接收实时路况信息，使用户及时掌握最新的道路状况，同时还可将车辆状况报告给交通信息中心，实现报警、求助和通信功能。

3.2.2 车辆定位导航系统的功能模块

典型的车辆定位导航系统由 7 个功能模块组成，如图 1.7-13 所示。

(1) 定位模块。定位模块由定位传感器和数据处理电路组成，其功能是提供实时、连续的车辆位置估计，以使系统能够正确辨别车辆当前的行驶路段和正在接近的交叉路口。

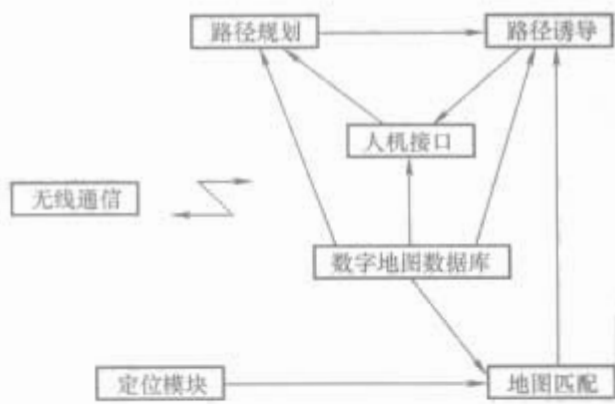


图 1.7-13 车辆导航定位系统基本模块

(2) 无线通信模块。无线通信模块通过一个或多个通信网络，使车辆及用户和交通管理系统之间能够相互交换实时交通信息，使车载系统和整个公路网络工作更加安全、有效。

(3) 数字地图数据库。数字地图数据库即为导航电子地图数据库，是现代车辆导航系统必不可少的组成部分，它包含以预定格式存储的数字化导航地图，其存储格式有助于计算机处理与地图有关的信息，并为系统提供地理特征、道路位置、交通规则、基础设施等多种重要信息。

(4) 路径规划。路径规划帮助驾驶员在出行前或出行中选择合适的行车路线，通常是依据电子地图中的交通路网信息，提供从车辆当前位置到目的地之间的总出行代价最小的路线供用户参考。出行代价可以是时间、距离、费用等用户关心的因素。如有可能，在进行路径规划时，还应考虑从无线通信网络中获取的实时交通信息，以便对道路交通状况的变化作出及时反应。

(5) 路径引导。路径引导帮助驾驶员沿预定路线行驶从而顺利到达目的地。它根据地图数据库中的道路信息和定位模块及地图匹配模块提供的当前车辆位置，产生适当的实时驾驶指令。

(6) 地图匹配。地图匹配将定位模块输出的位置估计与电子地图数据库提供的道路位置信息进行比较，并通过适当的模式匹配和识别过程确定车辆当前的行驶路段以及在路段中的准确位置。如果数字地图具有较高的位置坐标精度，这一技术将极大地改善系统的整体定位精度，并为实现路径引导提供可靠依据。

(7) 人机接口。人机接口提供用户与车载计算机系统间的交互接口，用户通过它将地图显示、信息查询、路径规划等操作指令输入到计算机系统中，计算机系统也通过它将以数字地图为背景的车辆位置、最优路径规划结果、实时驾驶引导指令等用户需要的信息以语音提示、可视图形等多媒体方式返回。

3.3 车辆定位导航系统中的定位技术

自动车辆定位导航系统是智能交通系统中非常关键的部分，利用它们可以很好地实现对交通运输系统整个过程的控制、交通信息服务、道路应急及多种信息服务。在车辆定位导航系统中，定位是实现导航功能的前提与基础。作为智能交通系统的主要功能之一，车载诱导要实现自动跟踪车辆的当前位置，并为出行者提供从当前位置到目的地的最优路径，只有做到实时准确的当前位置跟踪显示，才能实现真正意义上的诱导。因此，准确定位是实现智能交通系统主要功能的前提条件。

目前常用的车辆定位技术主要包括航迹推算技术、地面无线电定位技术、卫星定位技术、地图匹配技术、基于视觉的定位技术以及以上几种技术之间的组合定位技术等。在具体系统的实现过程中，有采用单独一个技术的方案，也有使用多个技术组合的方案。航迹推算定位、卫星定位是目前使用最广泛的两种定位方法。

3.3.1 航迹推算系统定位

航迹推算是车辆定位导航中采用的一种比较经典的算法。由于车辆的运动可以看作是在二维平面 (x, y) 上的运动，因此如果已知汽车的起始点 (x_0, y_0) 和初始航向角 θ_0 ，通过实时测量车辆的行驶距离和航向变化，就可以实时推算车辆载体的位置。航迹推算的原理如图 1.7-14 所示。

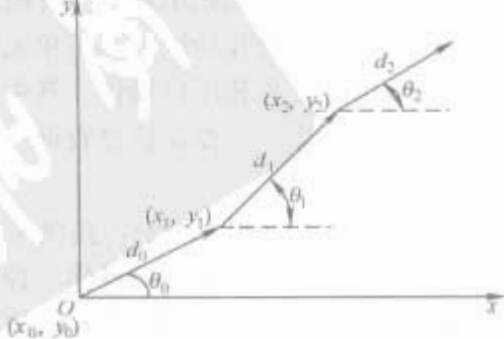


图 1.7-14 航迹推算系统基本原理图

具体算法如下

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + d_0 \cos \theta_0 \\ y_1 = y_0 + d_0 \sin \theta_0 \end{cases} \quad (1.7-1)$$

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + d_1 \cos \theta_1 = x_0 + d_0 \cos \theta_0 + d_1 \cos \theta_1 \\ y_2 = y_1 + d_1 \sin \theta_1 = y_0 + d_0 \sin \theta_0 + d_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (1.7-2)$$

依次推算下去, 则有

$$\begin{cases} x_k = x_0 + \sum_{i=0}^{k-1} d_i \cos \theta_i \\ y_k = y_0 + \sum_{i=0}^{k-1} d_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (1.7-3)$$

式中: (x_0, y_0) 为 t_0 时刻车辆的初始位置; d_i 为行驶距离或 t_{i-1} 到 t_i 时间间隔的位移量; θ_i 为位移方向的变化。

如果可以实时获得车辆的速度和角速度信息, 当采样周期恒定时 (小于车速变化的时间范围), 上式可改为

$$\begin{cases} x_n = x_0 + \sum_{i=0}^{n-1} v_i T \cos \theta_i \\ y_n = y_0 + \sum_{i=0}^{n-1} v_i T \sin \theta_i \\ \theta_n = \theta_0 + \omega_i T \end{cases} \quad (1.7-4)$$

式中: v_i 为在采样周期 T 时刻测量的速度。在每一个采样周期内, v_i 和 ω_i 基本上是常量。

航迹推算系统需要实时得到一定时间间隔内的距离变化量 d_i 和航向角 θ_i , 必须通过其他手段得到初始时刻的位置 (x_0, y_0) 和航向角 θ_0 。航迹推算是一个累加的过程, 不同时刻的测量误差和计算误差都会累积起来, 因此随着时间的推移, 航迹推算系统的误差是一个发散的过程。

在实际系统中, 车辆的位置都是用经纬度描述的。因此, 在地球表面, 航迹推算系统确定的车辆位置可描述为

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = v \cos \theta / R_e \\ \dot{\lambda} = v \sin \theta / R_e \cos \varphi \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1.7-5)$$

式中: φ 为纬度; λ 为经度; v 为载体速度大小; R_e 为地球半径; θ 为载体的航向角; ω 为载体的角速度。

3.3.2. 地面无线电定位技术

地面无线电定位技术的实现主要有以下几种方式:

(1) 设置标准点。沿公路两侧建立许多的标准点, 这些标准点的位置坐标是事先精确测定的。当车辆经过这些标准点时, 汽车接收这些标准点所发送的定位信息, 从而得到车辆位置。这种方案操作起来简单, 它比较适合有固定行驶路线的车辆使用。但是, 这种方案只能提供简单的定位信息, 不能够满足实时提供车辆定位信息的要求。另外, 在整个城市中建立足够多的标准点本身也是一个相当大的工作量, 并且在某些情况和环境中也是不现实的。

(2) 罗兰—C。这种系统的缺点是造价比较高, 并且在城市里面, 由于建筑物和其他障碍物的遮挡, 存在着多路径效应和信息失落。另外, 由于城市里对无线电波的干扰源比

较多, 因此对于罗兰—C 导航系统的工作会产生较大的影响。

(3) 基于移动通信网络的定位技术。基于移动通信网络定位的方案有两类: 基于移动台的定位方案和基于网络的定位方案。前者是由移动台根据接收到的多个发射台的信号特征信息 (如场强、入射角、传播时间或时间差) 确定它与各发射台之间的几何位置关系, 再对它自身位置进行定位估计; 后者则由多个基站同时检测移动台发射的信号, 根据信号的特征信息由蜂窝网络对移动台进行定位估计。目前, 基于 GSM 和 CDMA 技术的蜂窝网络定位系统已经进入商用, 但由于电波的非视距传播, 多径效应和多址干扰, 基站之间及基站与移动台之间的时间同步误差、测量误差等因素的影响, 其定位精度和可靠性还难以与 GPS 定位相比。

3.3.3 GPS 卫星定位

3.3.3.1 GPS 的组成

全球定位系统是 20 世纪 70 年代中期美国国防部开始发展的第二带卫星导航系统, 是目前应用最广泛的一种卫星定位导航方式。GPS 可以提供全球范围的导航定位数据, 用户实时接收卫星发出的星历, 可以解算出用户当前的位置、速度和时间等定位信息。

GPS 由三大子系统构成:

(1) 空间卫星系统: 包括 24 颗导航卫星, 均匀分布在六条轨道上。导航卫星接收地面注入站向卫星发送的导航信息, 包括卫星星历、时钟校正参数、大气校正参数等。卫星上装有精密的原子钟, 而且各卫星的原子钟和地面站的原子钟相互同步, 建立了导航卫星系统的精密时系。

(2) 地面监控系统: 地面监控系统又称地面站。地面站包括 1 个主控站、4 个监测站、1 个注入站。主控站的主要职能是根据各监测站送来的信息计算各卫星的星历、卫星时钟修正量、按规定的方式编制导航电文, 以便于通过注入站注入卫星; 监测站的主要职能是在主控站的控制下接收卫星信号, 收集当地的气象数据, 由信息处理机处理收集到的全部信息, 并传送给主控站; 注入站的主要职能是当卫星通过其视野时, 将导航信息注入卫星, 同时还负责监视卫星的导航信息是否正确。

(3) 用户接收系统: 包括天线、接收机、微处理机、控制显示设备等, 有时统称为 GPS 接收机。GPS 接收机接收 GPS 卫星发送的导航电文, 包括卫星状态、卫星星历、卫星钟偏差校正参数以及时间等内容。

3.3.3.2 GPS 的特点

(1) 全球地面连续覆盖。由于 GPS 卫星的数目较多, 且分布合理, 因此地球上任何地点均可连续地同步观测到至少 4 颗卫星, 从而保障了全球、全天候连续的三维定位。

(2) 实时定位。利用全球定位系统, 可以实时地确定运动目标的三维位置和速度。

(3) 定位精度高。大量实验和研究表明, 目前在小于 50 km 的基线上, 其相对定位精度可达 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$, 而在 100~500km 基线上可达 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。

(4) 操作简便。GPS 测量的自动化程度很高, 且接收机的质量较轻、体积较小, 携带和搬运都很方便。

3.3.3.3 GPS 定位的基本原理

GPS 的定位原理, 简单来说, 是利用几何与物理的一些基本原理, 利用空间分布的卫星以及卫星与地面点间的距离交会出地面点位置的方法。因此, 若假定卫星的位置为已知, 且通过一定的方法准确测定出了地面某一点至卫星间的

距离,则地面上该点一定位于以卫星为中心、以所测得距离为半径的圆球上。若能同时测得该地面点至另两颗卫星的距离,则根据三圆球交汇原理,很容易确定所需要的点。在以上假设下,即已知卫星位置、又已同时测定地面点到三颗卫星的距离,则地面点的位置就可确定,即定位。但由于GPS卫星是分布在20000多千米高空的运动载体,只能是在同一时间测定三个距离才可定位,要实现同步必须具有统一的时间基准。从解析几何角度出发,GPS定位包括确定一个点的三维坐标与实现同步四个未知参数,因此必须通过测定到至少4颗卫星的距离才能定位。

GPS定位根据测距的原理与方法不同,分为伪距法定位与载波相位测量定位。采用伪距法测量定位速度最快,而采用载波相位测量定位精度最高。

(1) 伪距定位原理。GPS伪距定位原理是当卫星时钟和用户时钟同步时,用户计算卫星和接收机之间时钟延时 τ ,则卫星和用户之间的距离 r

$$r=c\tau \tag{1.7-6}$$

式中: c 为光速。

若考虑卫星和时钟有钟差 Δt_u ,这时测得的距离称为伪距 ρ

$$\rho=r+c\Delta t_u \tag{1.7-7}$$

对第 i 颗卫星,用户测得的伪距为

$$\rho_i=r_i+c\Delta t_u \tag{1.7-8}$$

$$r_i=[(x-x_{si})^2+(y-y_{si})^2+(z-z_{si})^2]^{\frac{1}{2}} \tag{1.7-9}$$

式中: x, y, z 和 x_{si}, y_{si}, z_{si} 分别是用户和卫星 i 在地球坐标系中的位置坐标。

显然为计算 $x, y, z, \Delta t_u$ 4个未知量,需要测量到4颗卫星的伪距,由此可得4个独立方程,即

$$\rho_i=[(x-x_{si})^2+(y-y_{si})^2+(z-z_{si})^2]^{\frac{1}{2}}+c\Delta t_u \tag{1.7-10}$$

($i=1, 2, 3, 4$)

(2) 载波相位测量原理。载波相位测量是利用GPS卫星发射的载波为测距信号。由于载波的波长($\lambda_{L1}=19\text{cm}, \lambda_{L2}=24\text{cm}$)比测距码元宽度要短得多,因此对载波进行相位测量,就可能得到较高的测量定位精度。

假设卫星 S 在 t_0 时刻发出一载波信号,其相位为 φ_S 。此时若接收机 R 产生一个频率和初相位与卫星载波信号完全一致的基准信号,在 t_0 瞬间的相位为 φ_R 。假设这两个相位间相差 N_0 个周信号和不足一周的相位 $F_r(\varphi)$ (称为零数),则可求得 t_0 时刻接收机天线到卫星的距离为

$$\rho=\lambda(\varphi_R-\varphi_S)=\lambda[N_0+F_r(\varphi)] \tag{1.7-11}$$

在载波相位测量中,接收机无法判定所测量信号的整周数 N_0 ,但可精确测定其零数 $F_r(\varphi)$,并且当接收机对空中飞行的卫星作连续观测时,接收机借助于内含多普勒频移计数器,可累计得到载波信号的整周变化数 $\text{Int}(\varphi)$ 。因此, $\tilde{\varphi}=\text{Int}(\varphi)+F_r(\varphi)$ 才是载波相位测量的真正观测值;而 N_0 称为整周模糊度,它是一个未知数,但只要观测是连续的,则各次观测的完整测量值中应含有相同的 N_0 。也就是说,完整的载波相位观测值应为

$$\varphi=N_0+\tilde{\varphi}=N_0+\text{Int}(\varphi)+F_r(\varphi) \tag{1.7-12}$$

如图1.7-15所示,在 t_0 时刻首次观测值中 $\text{Int}(\varphi)=0$,

不足整周数的零数为 $F_r(\varphi)$, N_0 是未知数;在 t_i 时刻 N_0 值不变,接收机实际观测值由信号 $\tilde{\varphi}$ 整周变化数 $\text{Int}^i(\varphi)$ 及零数 $F_r(\varphi)$ 组成。

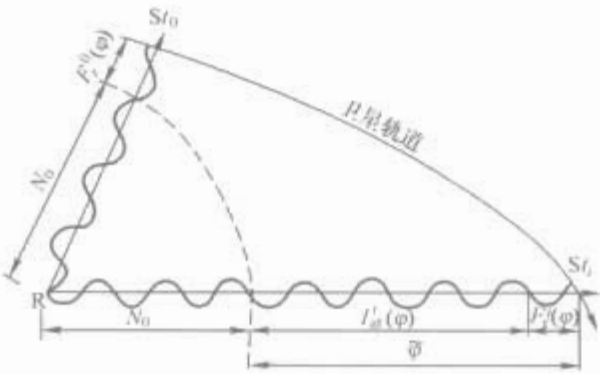


图 1.7-15 载波相位测量

(3) 差分GPS定位原理。由于GPS系统在SA(Selective Availability)政策下提供的单点定位精度在100m左右,对于交通流诱导这种精度难以满足要求。为了解决这个问题,提高定位的精度,提出了差分的技术。所谓差分GPS(Differential GPS)就是将一个已精确测定的已知点作为差分基准点,在此点安装GPS接收机,连续接收GPS信号,通过处理再与已知的精确位置作比较,不断确定当前的误差,然后把它通过通信链传送到该地区的所有移动GPS用户,以修正它们的定位解。其原理如图1.7-16所示。

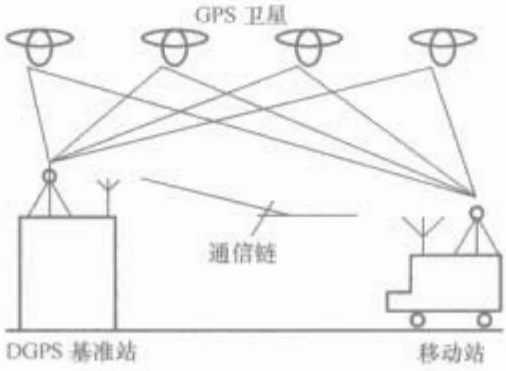


图 1.7-16 DGPS 原理图

实现DGPS的方法有多种,包括位置差分法、伪距差分法、载波相位差分法等。这几类差分方式的工作方式是相同的,即都由基准站发送改正数,由用户接收并对其测量结果进行改正,以获得精确的定位结果。所不同的是,发送改正数的具体内容不一样,其差分定位精度也不同。

(1) 位置差分原理。这是一种最简单的差分方法。

1) 安装在基准站上的GPS接收机观测4颗卫星后便可进行三维定位,解算出基准站的坐标。由于存在着轨道误差、时钟误差、SA影响、大气影响、多径效应以及其他误差,解算出的坐标与基准站的已知坐标是不一样的,即存在误差

$$\Delta x = x' - x_0 \quad \Delta y = y' - y_0 \quad \Delta z = z' - z_0 \tag{1.7-13}$$

式中: x', y', z' 为GPS实测的坐标; x_0, y_0, z_0 为采用其他方法求得的基准站精确坐标; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为坐标改正数。

2) 基准站利用数据链将此改正数发出去,由用户站接收,并且对其解算的用户站坐标进行改进

$$x_u = x'_u + \Delta x \quad y_u = y'_u + \Delta y \quad z_u = z'_u + \Delta z \tag{1.7-14}$$

3) 如考虑到用户站的位置改正值瞬间变化, 则

$$\begin{aligned}x_u &= x_u^* + \Delta x + \frac{d(\Delta x)}{dt}(t - t_0) \\y_u &= y_u^* + \Delta y + \frac{d(\Delta y)}{dt}(t - t_0) \\z_u &= z_u^* + \Delta z + \frac{d(\Delta z)}{dt}(t - t_0)\end{aligned}\quad (1.7-15)$$

式中: t_0 为校正的有效时刻。

4) 最后得到的改正后的用户坐标已消去了基准站与用户站的共同误差, 如卫星轨道误差、SA 影响、大气影响等, 提高了定位精度。以上先决条件是基准站和用户站观测同一组卫星的情况。

这种差分方法的优点是计算方法简单, 只需要在解算的坐标中加改正数即可, 能适用于一切 GPS 接收机。缺点是必须严格保持基准站与用户站观测同一组卫星: 如果有 8 颗可观测卫星, 将有 70 个组合, 基准站和用户站观测环境也不能保证完全相同, 因此无法保证两站观测到同一组卫星。

(2) 伪距差分原理。这是目前应用最广的一种技术。在基准站 GPS 接收机测量出可见的所有卫星的伪距 ρ_i 和搜索全部卫星的星历文件, 计算出各卫星的地心坐标 (x_s^i, y_s^i, z_s^i) , 又根据其他方法得到基准站的准确地心坐标 (x_0, y_0, z_0) , 则可利用二者反求出各卫星到基准站的实距 R_s^i

$$R_s^i = \sqrt{(x_s^i - x_p)^2 + (y_s^i - y_p)^2 + (z_s^i - z_p)^2}\quad (1.7-16)$$

同时基准站 GPS 接收机测量到的伪距 ρ_i 包含各种误差, 可以求出伪距的误差修正值

$$\Delta \rho_i = R_s^i - \rho_i^i\quad (1.7-17)$$

又可求出伪距误差修正值的变化率

$$\Delta \rho_i = \Delta \rho_i^i / \Delta t\quad (1.7-18)$$

基准站将 $\Delta \rho_i^i$, $\Delta \rho_i$ 传送给用户, 则用户至卫星的伪距为

$$\rho_{uc}^i(t) = \rho_u^i(t) + \Delta \rho_i^i(t) + \Delta \rho_i(t - t_0)\quad (1.7-19)$$

由于修正后的伪距去除了基准站与用户共同的系统误差, 因而

$$\begin{aligned}\rho_{uc}^i(t) &= R_u^i + C(\Delta t_{PR} - \Delta t_{SV}) + V_0 \\&= \sqrt{(x_s^i - x_p)^2 + (y_s^i - y_p)^2 + (z_s^i - z_p)^2} + \Delta d\rho\end{aligned}\quad (1.7-20)$$

式中: x_p, y_p, z_p 为用户点地心坐标; $(\Delta t_{PR} - \Delta t_{SV})$ 为用户接收机与卫星的时钟差; V_0 为接收机噪声; $\Delta d\rho$ 为同一观测历元的残差和。

综合式(1.7-19)、式(1.7-20), 可在观测 4 颗卫星的基础上求出用户点坐标的 DGPS 解。与位置差分相比, 伪距差分具有如下优点: 基准站能够提供可见的所有卫星的修正值, 因而用户可选择接收任意 4 颗卫星的信号; 计算的伪距修正值是直接在 WGS-84 坐标系上求得的, 是直接修正值, 不用换算为当地坐标, 因而定位精度高。当然两种方法均要求: 基准站的坐标要精确测定, 这是 DGPS 的基础; 用户与基准站之间的距离要有限制, 一般在 100km 以内, 否则电离层延迟将导致较大误差。

(3) 载波相位差分原理。

1) 载波相位差分技术是建立在实时处理 2 个测站的载波相位基础上的。它能实时提供观测点的三维坐标, 并达到厘米级的高精度。

2) 实现载波相位差分 GPS 的方法分为两类: 修正法和差分法。前者与伪距差分相同, 基准站将载波相位修正量发

送给用户站, 以改正其载波相位, 然后求解坐标。后者将基准站采集的载波相位发送给用户站进行求差、解算坐标。

3.3.4 其他卫星定位技术

全球海军导航卫星系统 (Global Navy Navigation Satellite System, GLONASS) 是前苏联紧跟美国 GPS 空间计划平行发展的。1982 年 10 月 12 日, 前苏联由空军部队在拜哈努尔发射了第一颗 GLONASS 卫星, 自那时起, 经过 13 年的周折, 截至 1995 年底, 一共发射了 73 颗卫星。现在, 在轨道上正常运行的卫星有 25 颗, 已经完成了 24+1 的星座布局。

GLONASS 系统的 24 颗卫星均匀分布在如图 1.7-17 所示的 3 个轨道平面上, 每个平面上分布 8 颗卫星, 提供着 GLONASS 卫星的导航电文。该系统采用的是 PZ-90 坐标系, 时间基准是 UTC-SU 时间。而 GPS 采用的是 WGS84 坐标系, 时间基准是 UTC-USNO 标准时间。

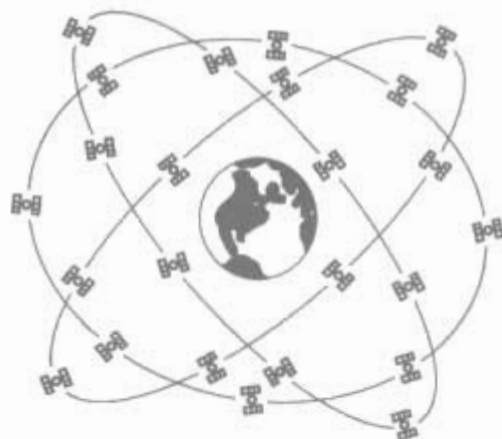


图 1.7-17 GLONASS 卫星星座

3.3.5 组合定位技术

基于任何一种单独定位技术的系统都有自身无法克服的缺点。因此近些年来组合导航系统成为研究的热点, 它将不同系统的信息进行融合, 选择适当的融合算法, 从而得到最优或次优的结果。通过组合克服了单个系统的缺点, 使组合后的系统在满足成本要求的前提下, 系统的可靠性、精度、完整性都得到提高。目前使用的组合方案主要有以下几种:

(1) 航迹推算系统+地图匹配。通过地图匹配技术可以消除航迹推算系统的积累误差, 使系统的定位精度提高, 同时这是一种自动导航的系统。但是这种方案有着自身的不足。首先, 航迹推算的初始位置需要外界提供, 不能够自主得到; 其次, 当车辆行驶在直路上的时候, 地图匹配只能够消除垂直于道路方向的积累误差, 而对沿着道路方向上的积累误差的消除情况不理想。如果航迹推算系统的积累误差太大, 地图匹配也无法消除其误差。因此, 需要使用较高精度的航迹推算器件 (如高精度的陀螺)、高精度的电子地图和复杂的匹配算法, 这就需要较高成本。

(2) GPS+地图匹配。由于 GPS 本身存在着一定的定位误差, 通过地图匹配可以消除一部分 GPS 的定位误差, 使整个系统的定位精度提高。但是, GPS 存在因受到遮挡而使信息失落的情况。当这种非正常情况持续的时间较短时, 还可以利用前面的定位信息在地图上面进行推算; 当这种非正常情况持续的时间较长时, 整个组合系统就不能够正常工作了。

(3) GPS+航迹推算系统。GPS 与航迹推算系统组合是目前研究和应用比较多的系统。利用 GPS 绝对定位、误差有界的优点来弥补航迹推算系统的误差发散、不能初始定位的缺点; 利用航迹推算系统自动定位的优点来解决 GPS 信

息失落等问题,从而使整个系统的性能、可靠性得到提高。

(4) GPS+航迹推算系统+地图匹配。将 GPS、航迹推算系统以及电子地图三者的信息进行融合,在地图精度足够高的情况下,该技术能够有效地减少车辆运行时的累积误差,提高导航系统的定位精度和可靠性。将三者信息融合在一起一般有两种方案:一种方案是将 GPS 和航迹推算系统组合后的定位结果引入到电子地图中,利用地图匹配技术进一步修正定位结果;另一种方案是将 GPS、航迹推算系统和电子地图三者的定位信息一起进行组合滤波,得到整个系统的最优解。

4 地图匹配技术

地图匹配是一种通过软件方法校正定位误差的技术。该技术以模式识别理论为基础,将车辆导航系统测得的车辆位置信息或行驶轨迹与车载的电子地图通过某些准则进行比较、匹配,找到车辆最大可能所在的道路,并计算出车辆在此道路上的位置,从而校正车辆导航系统的误差。这样,就可以消除累积误差,直到进行下一次地图匹配步骤。在每一个连续的系统周期中完成这个过程,就能实时得到更加准确的车辆位置。

4.1 地图匹配的原理

导航电子地图的道路网数据以若干节点的形式存储,在每两个节点之间,道路都以直线近似,忽略道路的宽度。在每个节点处设立一个判断区域,当车辆在域外行驶时,可以认为其运动轨迹是一条直线;当进入判断区域时,车辆将有可能作角运动。此时,利用定位传感器的输出来判断汽车是否开始转弯,若没有,则认为汽车还没有到达路口,进行地图匹配修正;若有角运动,则在更小的判断域内作进一步判断。当汽车开出判断域后,根据转弯的角度和路网信息确定下一条行驶路线,在新路线上进行位置匹配。

- 一般而言,地图匹配算法在匹配中应完成以下过程:
- (1) 通过预处理、特征提取等步骤对待匹配样本和所有模板进行分析、描述,并提取出相应的位置或形状特征。
 - (2) 根据算法的匹配规则,依次计算待匹配样本和所有模板间的匹配相似度。
 - (3) 选取相似度最高的位置点或道路曲线模板,作为待匹配样本车辆位置点或车行轨迹曲线的匹配、分类结果。

一个完整的地图匹配算法包括三个主要的处理过程,即确定误差区域、选取匹配路段和计算修正结果。地图匹配的原理示意图如图 1.7-18 所示。

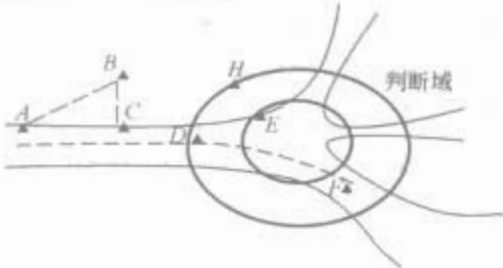


图 1.7-18 地图匹配原理图

假设车辆从 A 点出发,在行驶过程中某一时刻,定位系统输出的定位位置在 B 点,未进入判断域内,因此车辆仍在 A-E 路段上,利用一定规则把 B 点投影到 A-E 段上即可;当车辆继续行驶进入判断域内,假定定位系统输出的定位位置在 H 点,若方位角的变化在一定范围内,车辆仍

在 A-E 路段或其延长线上,按规则将 H 点向 A-E 线段投影即可;若方位角的变化大于某范围,则车辆作转弯运动。如果还没有进入判断区域,则直接将 H 点定位到路口 E 点;如果已经进入判断区域,则首先记忆该点直到新的定位点 F 不在判断区域内,把 E 和 F 之间的定位点用光滑的曲线连接形成轨迹。同时,进入判断域后,利用已知的当前位置对定位系统输出的定位数据进行修正,达到对定位系统误差修正的目的。判断域的选择由定位系统的定位精度和定位系统传感器的误差模型共同决定。

4.2 误差区域的选择

误差区域是指可能包含车辆真实位置的区域范围,它应根据传感器定位结果和误差情况确定。在误差区域内的道路称为候选路段,地图匹配算法认为其中包含了车辆的真实位置。匹配路段的选取是从候选路段中挑选最有可能是车辆行驶路段,挑选的原则依据具体的算法设计而不同,通常的标准是数字地图中的道路形状与车辆轨迹的相似程度。确定匹配路段后,计算车辆在该路段中最可能的位置,并用结果修正原有的定位输出。

一般的,按概率准则定义误差区域,即误差区域必须以一定的概率包含车辆的实际位置。根据统计理论,假设定位系统的方差、协方差矩阵模型化为

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \tag{1.7-21}$$

式中: σ_x 和 σ_y 是传感器测量误差的东向和北向的测量标准差; σ_x^2 和 σ_y^2 是方差; σ_{xy} 和 σ_{yx} 是协方差,则可按下式定义定位误差椭圆

$$\begin{aligned} a &= \hat{\sigma}_0 \sqrt{1/2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2})} \\ b &= \hat{\sigma}_0 \sqrt{1/2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2})} \\ \varphi &= \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}\right) \end{aligned} \tag{1.7-22}$$

式中: a 为椭圆半长轴; b 为椭圆短半轴; φ 为椭圆半长轴取向与正北方向的夹角; $\hat{\sigma}_0$ 为单位权值的后验方差,又称为扩展因子。椭圆中心是当前的车辆位置,如图 1.7-19 所示。通过改变扩展因子 $\hat{\sigma}_0$ 的值可以调整椭圆的大小以获得不同的置信度,假设测量误差的分布是标准正态分布,标准椭圆 ($\hat{\sigma}_0=1$) 对应于 39% 的置信区域,取 $\hat{\sigma}_0=3.03$,则可获得 95% 的置信度。

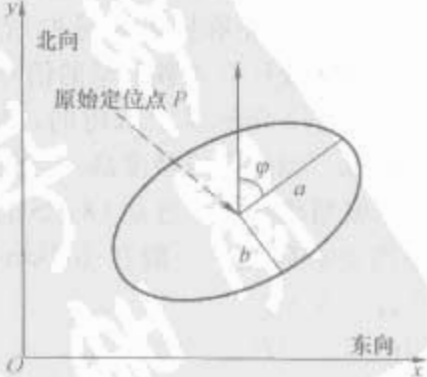


图 1.7-19 定位误差椭圆

在基于 GPS 的车辆导航系统中,利用 GPS 的参数即可获得误差椭圆。对导航型 GPS 接收机,其定位误差参数由式 (1.7-23) 确定

$$\begin{aligned} P = \text{cov}(\delta X) &= \sigma_0^2 \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{tx} & \sigma_{ty} & \sigma_{tz} & \sigma_t^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.7-23)$$

式中：对角线元素为定位解 (x_k, y_k, z_k) 和钟差 b_k 的方差；其余元素是各参量之间的协方差； σ_0^2 为伪距观测方差。由于 GPS 具有稳定的定位精度，且其误差不随时间增加，在应用 GPS 的车辆定位导航系统中可采用 GPS 的定位误差参数定义误差椭圆。

4.3 地图匹配的算法

地图匹配算法所要解决的核心问题有两个：在给定位数数据和地图信息的基础上寻找最可能的行车路段，该过程称为道路选择过程；然后，选择车辆在该条道路上最可能的位置，该过程称为匹配过程。

4.3.1 道路选择算法

4.3.1.1 基于几何学的方法

基于几何学的方法的主要思想是在候选道路中找出与车辆行驶轨迹形状最相似的道路作为车辆当前行驶的正确道路。代表性的算法是相关性算法，其基本原理是利用拐角和交叉或曲线路段的形状特性对定位系统测出数据进行校正。假设车辆在 $t=1, 2, 3, \dots, k$ ($k \leq N$) 的时刻内定位系统测出的车辆行驶轨迹分别是 S_1, S_2, \dots, S_k ，对应于电子地图有 i 条可能行驶路线，并设地图上与定位系统测出数据对应的轨迹（可用最近点估计求出）分别为 $L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ik}$ ，是 i 组序列。计算测出轨迹与 i 组地图数据的相关性系数，即

$$\rho_i = \frac{\sum_{k=1}^n (S_k - \bar{S})(L_{ik} - \bar{L}_i)}{N \delta_S \delta_{L_i}} \quad (1.7-24)$$

式中： δ_S 、 δ_{L_i} 分别为序列 S_k 和 L_{ik} 的标准差。

$$\bar{S} = \frac{\sum_{k=1}^N S_k}{N}, \bar{L}_i = \frac{\sum_{k=1}^N L_{ik}}{N} \quad (1.7-25)$$

$$\delta_{L_i} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (L_{ik} - \bar{L}_i)^2}, \delta_S = \sqrt{\sum_{k=1}^N (S_k - \bar{S})^2} \quad (1.7-26)$$

ρ_i 值较大，表示测出轨迹和地图上某一条道路轨迹具有较高的相似性。在所有候选道路中与实际测出路径相关性最高的路线即为车辆行驶的真实路线。

相关性算法的优点是算法简单、容易实现。在车辆行驶航向有较大改变，如在十字路口拐弯或角度变化较大的曲线和折线路段时，效果最好。但在其他情况下有很大缺陷，易出现两条候选道路相关性相差不大的情况，造成实际行驶路线无法确定。为解决这一问题，可附加采用最小方差的估计方法，其判据如下

$$\delta_i = \sqrt{\sum_{k=1}^N (S_k - L_{ik})^2} \quad (1.7-27)$$

通常，车辆定位轨迹和真实路径的方差最小，所以方差最小且相关系数较大的通常为真实路径。此改进只在车辆拐过一定的角度时有效，当行驶路线为直线路段时将失效。因此，该算法必须进一步改进，或与其他匹配算法结合使用，才可保证匹配的可靠运行。

4.3.1.2 基于 D-S 证据推理的方法

D-S 证据推理理论最先是由 Dempster 提出、后由 Shafer 进一步发展起来的一种不确定推理理论，是对传统的贝叶斯理论的重要推广。设问题 Q ，其全部可能的答案用集合 U 表示， U 称为问题 Q 的识别框。令 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ， U 的各元素是互斥的， U 的子集称作命题， U 的幂集 2^U 构成了所有命题的集合。有且仅有一个元素 $u^* \in U$ 是 Q 的正确答案，决策者希望基于某些证据找到这个 u^* 。由于证据的不完备、不精确或不完全可靠等原因，决策者可能无法确定 u^* ，但基于一定证据在不同程度上确定 u^* 所处的各种范围是可能的。

下面以两条道路为例说明 D-S 理论对匹配道路信息的融合。根据 D-S 证据理论，首先建立一个识别框

$$U = \{A_1, A_2\} \quad (1.7-28)$$

式中： A_1 表示当前时刻车辆在第 1 号道路上， A_2 表示当前时刻车辆在第 1 号道路上。则所有的命题集合，

$$2^U = \{A_1, A_2, A_1 \cup A_2\} \quad (1.7-29)$$

式中： $A_1 \cup A_2$ 表示不确定在哪条道路上。

在置信椭圆中选取一些点 A_i ，一般选取椭圆中心点、长短轴的端点共 5 个点。分别向两条道路投影，并计算与道路之间的距离 D 。如果投影点在道路的延长线上，则认为无法投影。根据距离 D 的大小进行分段以确定选择道路的可信度 m

$$m = \begin{cases} 0.8 & D < 20m \\ 0.6 & 20m \leq D < 40m \\ 0.4 & 40m \leq D < 60m \\ 0.2 & 60m \leq D < 80m \\ 0.1 & 80m \leq D < 100m \\ 0.05 & D \geq 100m \\ 0 & \text{无法投影} \end{cases} \quad (1.7-30)$$

对计算出的道路 1 的可信度 $m_1(A_i)$ ($i=1 \sim 5$) 和道路 2 的可信度 $m_2(A_j)$ ($j=1 \sim 5$) 按式 (1.7-31) 进行融合，根据融合后每条道路的矛盾因子的大小判断车辆行驶的正确道路。

$$m_{1,2}(A) = \frac{\sum_{A_i \cap A_j = A} m_1(A_i) m_2(A_j)}{1 - M} \quad (1.7-31)$$

$$M = \sum_{A_i \cap A_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j)$$

式中： $m_{1,2}(A)$ 为矛盾因子。

4.3.1.3 基于曲线拟合的地图匹配算法

在实际应用中经常需要确定两个变量 x, y 之间的关系。多数情况下，由于测试误差导致测试点分散，所求的曲线无法通过所有的测试点，因此需要一条平滑的曲线 $y=f(x)$ 来近似测试结果，使之能反映给定测试数据的一般趋势，并且尽量使曲线没有局部的波动，这就是曲线拟合。为了使拟合曲线的函数表达式便于计算和使用，函数表达式应既简单又便于计算和分析，多项式函数可以很好地满足这种要求。

用一个 m 次多项式 $y(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_mx^m$ 拟合 n 个观测数据点 (x_i, y_i) ， $i=1, 2, \dots, n$ 。为了求

b_0, b_1, \dots, b_m , 根据多元线性回归理论解出正规方程组。将正规方程组写成矩阵的形式

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{B} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \tag{1.7-32}$$

式中

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^m \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \cdots & x_3^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^m \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}, \mathbf{X}^T \text{ 是 } \mathbf{X} \text{ 的转置矩阵。}$$

令 $\mathbf{A} = \mathbf{X}^T \mathbf{X}$, $\mathbf{C} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$, 则问题转化为求解线性代数方程组

$$\mathbf{AB} = \mathbf{C} \tag{1.7-33}$$

矢量电子地图中任意道路都是由一系列的点元组成, 每一点元的位置都是已知的。由于电子地图中的路段是用直线段或折线来近似的, 考虑到车辆在道路上行驶这个地图匹配的前提, 在一定的行驶距离内可以用直线来拟合车辆的历史轨迹。鉴于道路本身的可能最短长度以及计算量选取 5 个观测点, 作一次拟合曲线, 即用直线拟合, 由曲线拟合的原理可知

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C} = \frac{1}{5 \sum_{i=1}^5 x_i^2 - (\sum_{i=1}^5 x_i)^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 x_i^2 \sum_{i=1}^5 y_i - \sum_{i=1}^5 x_i \sum_{i=1}^5 x_i y_i \\ - \sum_{i=1}^5 x_i \sum_{i=1}^5 y_i + 5 \sum_{i=1}^5 x_i y_i \end{bmatrix} \tag{1.7-34}$$

式中: (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, 5$, 为 5 个观测点的平面坐标。

由此求得轨迹拟合直线的斜率为

$$k = \frac{- \sum_{i=1}^5 x_i \sum_{i=1}^5 y_i + 5 \sum_{i=1}^5 x_i y_i}{5 \sum_{i=1}^5 x_i^2 - (\sum_{i=1}^5 x_i)^2} \tag{1.7-35}$$

由地图匹配的原理, 只需关注 k , k 反映了车辆大概的行驶方向。在测量误差允许的范围, 根据实际需要确定可以接受的轨迹和路段之间的夹角度数, 再考虑车辆的位置信息。由上, 可列出基于曲线拟合的地图匹配算法的评价函数 s 为

$$s = p_1 \frac{\arctan(k) - \arctan(k_0)}{\pi/6} + p_2 \frac{d}{60} \tag{1.7-36}$$

式中: k 为拟合直线的斜率; k_0 为候选路段的斜率; d 为测量位置点到候选路段的垂直投影距离; p_1 、 p_2 分别为夹角和距离的权值。

选取最小值作为待匹配路段, 即在考虑角度和距离因素的情况下, 该路段达到最优。 p_1 、 p_2 可根据实际情况调节。

4.3.1.4 基于代价函数的地图匹配

基于代价函数的地图匹配算法是为每个可能的匹配位置定义一个误差代价函数, 以衡量匹配位置与传感器定位数据间的相似程度, 然后算法对每条候选路段对应的一系列匹配

位置的代价函数值作累加计算, 并据此判断候选路段与定位轨迹间的相似程度。如果代价函数选取得当, 则当候选道路模式与定位轨迹不相吻合时, 代价函数的累加值将迅速增长。

考虑如图 1.7-20 所示的情况。假定 k 时刻系统输出的位置估计为 P_k (图中以实心点表示), 其东向和北向坐标为 (\hat{x}_k, \hat{y}_k) ; 相应的候选匹配位置有四个, 分别用 1~4 标记 (图中空心点), 则对应第 j 个匹配位置, 定义如下的误差代价函数

$$C_k^j = w_x^2 (\epsilon_{x,k}^j)^2 + w_y^2 (\epsilon_{y,k}^j)^2 + w_\theta^2 (\epsilon_{\theta,k}^j)^2 + w_d^2 (\epsilon_{d,k}^j)^2 \tag{1.7-37}$$

式中: $\epsilon_{x,k}^j$ 、 $\epsilon_{y,k}^j$ 、 $\epsilon_{\theta,k}^j$ 、 $\epsilon_{d,k}^j$ 为四个不同的误差估计项; w_x 、 w_y 、 w_θ 、 w_d 为分配给各误差估计项的权值; $\epsilon_{x,k}^j$ 、 $\epsilon_{y,k}^j$ 为东向和北向位置误差估计项。

$\epsilon_{\theta,k}^j$ 是方向误差估计项, 分别定义如下

$$\epsilon_{x,k}^j = \hat{x}_k - x_{c,k}^j$$
$$\epsilon_{y,k}^j = \hat{y}_k - y_{c,k}^j$$
$$\epsilon_{\theta,k}^j = \hat{\theta}_k - \theta_{c,k}^j \tag{1.7-38}$$

式中: $x_{c,k}^j$ 、 $y_{c,k}^j$ 分别为匹配位置 j 的东向和北向位置坐标; $\hat{\theta}_k$ 为 k 时刻系统输出的行车方向估计; $\theta_{c,k}^j$ 为匹配位置 j 所在路段在该点的方向取值。

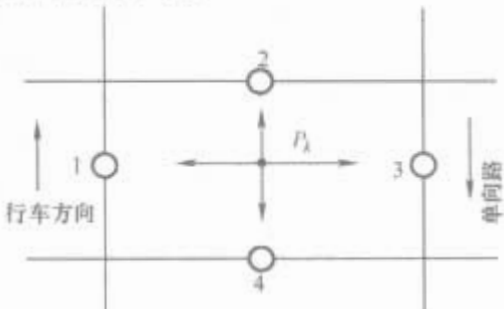


图 1.7-20 地图匹配示例

根据上述定义, 图 1.7-20 中的 4 个匹配位置的位置误差项差别不大, 但 2、4 两个位置的方向误差项较大, 位置 3 的交通规则约束项较大, 因此位置 1 的代价函数值最小, 是 k 时刻的最佳匹配位置。

以上述匹配位置的代价函数为基础, 可以进一步定义候选匹配路段的代价函数。对于标号为 j 的匹配路段, 设在时刻 k 上有 N 个可能的匹配位置, 则该匹配路段时刻 k 的代价函数定义为

$$C_{j,k}^* = \min \{C_k^1, C_k^2, \dots, C_k^N\} \tag{1.7-39}$$

式中: C_k^i ($i = 1, \dots, N$) 为第 i 个匹配位置的代价函数值。

为准确地判断并锁定车辆的行驶路段, 定义时刻 k 候选路段 j 的代价函数累加和为

$$S_k^j = \sum_{i=1}^k C_{j,i}^* \tag{1.7-40}$$

综上所述, 基于代价函数的地图匹配算法可描述如下: 设 k 时刻误差区域内有 M 条候选路段, 则计算各路段的代价函数值和累加值, 并取路段 j 为 k 时刻的匹配路段, 使

$$S_k^j = \min_{i=1, \dots, M} \{S_k^i\} \tag{1.7-41}$$

而最佳匹配位置就是路段 j 为 k 时刻最小代价函数值的匹配位置。

4.3.1.5 基于模糊逻辑的算法

由于定位误差的存在, 候选道路与定位信息之间并没有

一种清晰的联系,系统往往得出“车辆很可能在某一条路上”这样的模糊结论。为得到精确的定位结果,必须对这种模糊性做出合理的评判。基于模糊逻辑的算法利用模糊逻辑评判规则来确定当前行驶道路,如定位点到路段的距离、GPS输出方向与道路方向的差值、是否具有连通性、是否是单行道等,并通过模糊推理得出结论。引入的规则不尽相同,主要依据候选道路与车辆轨迹的相似性和相关程度以及交通约束规则来定义。该算法比几何算法具有更好的鲁棒性,能从错误的定位中快速地恢复过来。但当定位误差较大以及道路网络密集且相似时不易实现匹配,且计算的开销较大。

4.3.2 匹配算法

在选择正确道路之后,就可以将传感器测量的车辆位置匹配到道路上,用于消除或校正传感器测量误差。匹配的主要算法有正交投影法、MAP估计器法等。

4.3.2.1 正交投影算法

正交投影算法是地图匹配中确定匹配点位置的最常用也是最直观的一种方法,其原理示意图如图1.7-21所示。

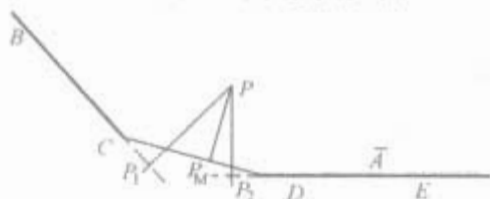


图 1.7-21 正交投影原理示意图

实际道路一般为曲线,而在电子地图数据库中通常对其分段线性化后再存储。图1.7-21中, \bar{A} 为选定的车辆所在的道路,B、E为道路 \bar{A} 上的端点,C、D为对 \bar{A} 分段线性化后得到的形状中间点,BC、CD、DE为对 \bar{A} 进行分段线性化后的路段(简称为“路段”)。P为已知的车辆位置的估计值,由P向选定道路 \bar{A} 的各“路段”作正交投影,根据投影距离最短,且非投影到“路段”的延长线(如 P_1 、 P_2 点)的原则,选取投影点 P_M 作为估计位置点P在选定道路 \bar{A} 上的匹配点。投影距离 d 和匹配点坐标为

$$d = |\overrightarrow{PP_M}| = \frac{|\overrightarrow{P_iP} \times \overrightarrow{P_iP_j}|}{|\overrightarrow{P_iP_j}|} \quad (1.7-42)$$

$$|\overrightarrow{P_iP_M}| = |\overrightarrow{P_iP} \cos \alpha| = \frac{|\overrightarrow{P_iP} \cdot \overrightarrow{P_iP_j}|}{|\overrightarrow{P_iP_j}|} \quad (1.7-43)$$

$$\text{long}_M = \text{long}_i + \frac{|\overrightarrow{P_iP_M}|}{|\overrightarrow{P_iP_j}|} (\text{long}_j - \text{long}_i) \quad (1.7-44)$$

$$\text{lat}_M = \text{lat}_i + \frac{|\overrightarrow{P_iP_M}|}{|\overrightarrow{P_iP_j}|} (\text{lat}_j - \text{lat}_i) \quad (1.7-45)$$

式中: $P_i(\text{long}_i, \text{lat}_i)$ 和 $P_j(\text{long}_j, \text{lat}_j)$ 分别为C和D点的坐标; $(\text{long}_M, \text{lat}_M)$ 为匹配点 P_M 的坐标。如遇到估计点P到选定道路各“路段”的投影都在延长线的情况(这种情况一般出现在多条道路交叉的端点附近),则选取距离最近的“路段”的端点作为其匹配点。

正交投影法实现很方便也很简单,实际应用也很多。但正交投影法仅仅能够消除传感器测量值中垂直于道路方向上的误差,对沿道路方向上的误差无法消除,容易导致超前、滞后现象的发生。

4.3.2.2 MAP估计器

MAP估计器算法是近来发展起来的一种根据位置估计值的噪声特性,使得匹配点的后验概率最大的一种匹配算法。

考虑将路网R上车辆活动区域的约束用一个均匀位置概率分布函数 $p(x)$ 来表示

$$p(x) = \begin{cases} 0, & x \notin R \\ k, & x \in R \end{cases} \quad (1.7-46)$$

式中: k 满足 $\int_R k dx = 1$ 。在噪声 η 存在的情况下,设传感器输出车辆真实位置 x 的观测值为 y 。一般的,传感器的测量值受许多独立的噪声源的影响,因此可以认为噪声 η 具有高斯分布。

$$y = x + \eta$$

$$p(y/x) = \frac{1}{|2\pi N|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2} [(y-x)^T N^{-1} (y-x)]} \quad (1.7-47)$$

式中: $p(y/x)$ 为测量值 y 在车辆真实位置为 x 时的条件概率; N 为测量噪声协方差阵。

$$N = E\{[\eta - E(\eta)]^T [\eta - E(\eta)]\} = \begin{bmatrix} \sigma_{\eta_1}^2 & \sigma_{\eta_{1,2}} \\ \sigma_{\eta_{1,2}} & \sigma_{\eta_2}^2 \end{bmatrix} \quad (1.7-48)$$

于是式(1.7-47)变换后有

$$p(y/x) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\eta_{1,2}}\sigma_{\eta_2}\sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{(y_1-x_1)^2}{\sigma_{\eta_1}^2} - \frac{(y_1-x_1)(y_2-x_2)}{\sigma_{\eta_1}\sigma_{\eta_2}} + \frac{(y_2-x_2)^2}{\sigma_{\eta_2}^2} \right]}$$

$$r = \frac{\sigma_{\eta_{1,2}}}{\sigma_{\eta_1}\sigma_{\eta_2}} \quad (1.7-49)$$

式中: r 为测量噪声的空间相关系数,且 $|r| \leq 1$ 。

在获得车辆位置观测值和观测噪声之后,就可以计算最优后验概率匹配值了,即测量值 y 的匹配值 \hat{x} 为:

$$\hat{x} = \arg \max_x [p(x)p(y/x)] \quad (1.7-50)$$

即 \hat{x} 是使得 $p(x)p(y/x)$ 最大的 x 的值。

4.4 地图匹配算法的影响因素

实时性、鲁棒性及匹配精度是衡量地图匹配算法质量的3个重要指标,成功的地图匹配算法应该兼有较强的实时性和鲁棒性,以及较高的匹配精度。

在选择道路正确的情况下,地图匹配精度可以用地图匹配结果与真实位置之间的偏差来定义。

4.4.1 影响实时性的因素

地图匹配过程主要包括匹配候选路段的确定及候选路段匹配规则两部分,其中前者是影响匹配算法实时性的主要因素,这点在道路网络的规模增大时表现越明显。一般来讲,匹配候选路段的确定时间越长,匹配规则越复杂,匹配算法的实时性越差,反之亦然。现有的匹配算法,虽然匹配规则及选取匹配候选路段时设定的条件不尽相同,但候选路段的选取都需要遍历整个道路网络,致使其实时性随着道路网络规模的增大而明显下降。

4.4.2 影响鲁棒性的因素

匹配算法的鲁棒性主要体现在匹配算法能否有效地处理匹配过程中可能出现的各种异常(如GPS接收数据无效或误差较大、车辆低速滑行或停止等),以使匹配算法遇到这些异常时,能够做出合理处理,而不影响后续工作。

4.4.3 影响匹配精度的因素

从地图匹配过程可以看出,影响匹配精度的因素主要包括以下三个方面。

4.4.3.1 GPS的定位误差

GPS的定位误差包括系统内部误差和外部突变误差。

(1) 系统内部误差。

1) 卫星测量误差。随着时间、空间的变化, GPS 会产生一定的误差, 如卫星时钟误差、星历误差、电离层或对流层的附加延时误差、多路径误差、接收机本身噪声等。

2) 卫星的几何位置造成的误差。

(2) 外部突变误差。在地形复杂的路段, 由于高楼、高架桥、高大树木和隧道等地物的阻挡, 使 GPS 接收机对部分卫星失去锁定, GPS 数据产生漂移现象, 出现较大的偏差甚至失去信号, 使得 GPS 数据接收的连续性受到一定的影响。GPS 数据的漂移变化越大, 引起的误差越明显。

4.4.3.2 坐标转换误差

由于 GPS 接收到的是 WGS-84 地心坐标系, 而我国目前的导航电子地图采用的是北京 54 坐标系和西安 80 坐标系, 采用的地球椭球参数不同, 因此必须要对 GPS 数据进行空间坐标系的转换。目前, 一般采用的换算模型有三参数法和七参数法。对其各种方法中参数的确定, 都有一定的假设前提, 并且在不同区域并非为一常数, 坐标变换的精度除取决于变换模型和求解参数的公共点坐标精度及数量外, 还和公共点的几何图形结构有关。一般认为, 由坐标转换带来的误差不超过 10m。

4.4.3.3 底层数据存在误差

进行地图匹配需要利用传感器的测量信息 (如 GPS、DRS) 和地图数据, 这些底层数据都可能存在误差:

(1) 地图数据误差。尽管一般认为地图数据的精度很高, 但是在作图中仍可能存在一定的误差。地图误差主要有两种: 几何误差和拓扑误差。几何误差是指地图数据与实际道路的位置、形状不相符。地图数据中记录的是道路的中心线, 但在实际情况中, 道路是有宽度的, 道路越宽, 车辆行驶的轨迹与道路形状可能就越不一致。另外, 地图数据是二维平面的, 没有高度信息, 与实际情况存在一定的偏差, 这种情况常见于立交桥、高架路、盘山路等。除此之外, 地图数据库中的道路和实际情况可能不一致 (如新修的道路, 现实世界中实际存在, 但在地图中没有相应的数据) 或连接关系与实际情况不相符。这种误差属于拓扑误差。地图匹配算法中也需要考虑这种情况。目前, 电子地图数据库的误差一般认为不超过 15m。

(2) 传感器误差。就比较常用的传感器 GPS 和 DRS 来讲, GPS 信号在有 SA 误差、都市内有高度建筑物、车速慢 (小于 40km/h 时)、GPS 接收机性能不好等情况下定位精度很差。即使是在 GPS 状态较好时也可能会有较大误差甚至出现突跳。GPS 状态不好也会造成错误匹配。航迹推算系统会随着时间推移产生积累误差, 如果长时间不进行修正, 其测量数据将不可用。

(3) 算法引入误差。

1) 错误匹配引入的误差: 在地图匹配过程中不可避免地会发生错误匹配, 发生错误匹配必然会对以后的地图匹配产生恶劣的影响。

2) 匹配修正引入的误差: 可以利用匹配结果 (匹配位置、道路方向) 修正传感器误差。但是即使在正确选择道路情况下也会引入误差, 尤其在发生超前、滞后或地图数据本身存在误差时。

(4) 路况复杂引入的误差。真实的道路情况是复杂多变的, 要保证车辆在各种复杂路况上都能够实现正确定位是比较困难的。下面是电子地图中经常出现的路况:

1) 普通路: 普通路就是没有特殊形状的道路, 可为高速路, 也可为一般路。此时, 选择正确道路较容易实现, 但也有错误匹配、超前、滞后、平行路间跳跃等现象发生。

2) 平行路: 所谓平行路, 就是两条或两条以上形状相似、距离相似的道路。平行路间的距离一般不大, 基本上道路之间的距离小于 10m 甚至只有几米。在平行路容易发生路间跳跃、超前、滞后等现象。

3) 都市道路: 在城市道路中, 道路比较稠密, 道路形状非常相似, 很容易发生错误选路, 并导致错误匹配。

4) 微小角: 由于微小角路况下分叉的两条 (甚至多条) 道路之间的角度差很小 (很多情况下小于 10°), 因此发生错误选路和错误匹配的概率非常高, 也容易出现因匹配到错误位置而引起位置间跳跃。

5) 停车场: 停车场有地下停车场、立体停车场、交叉点附近的停车场。尤其值得注意的是, 这些在地图数据中往往没有对应; 并且在地下停车场, 某些传感器 (如 GPS) 无法输出正确的测量值。这些都可能导致错误匹配的发生。

6) 盘山路: 由于地图不是三维的, 地图数据不可能完全吻合实际中的道路。此时, 容易出现超前、滞后现象。当道路比较弯曲时, 容易导致错误匹配。

7) 立交桥: 立交桥尤其有若干层次的立交桥, 往往还会遇到微小角甚至连续多个微小角路况 (进出立交桥时)。此时容易产生错误匹配、超前、滞后等现象。

8) 地下隧道: 与地下停车场类似。在地下隧道中无法获得某些传感器的测量值 (如 GPS), 必须采取有效的措施来保证车辆的正确定位。在长距离隧道内行驶过程中, 往往会产生车辆超前、滞后, 出隧道后很容易发生错误匹配、前后跳跃等现象。

9) 道路信息: 地图数据中有道路附属信息, 比如单行线道路、高速道路、都市道路等, 应该考虑充分利用这些信息。但实际上, 很多道路信息是不可用的。

(5) 车辆行驶中存在特殊情况引入的误差。地图匹配的基本前提是假设“车辆行驶在道路上”, 但实际情况中车辆有时会离开道路, 如路边停车场、加油站等; 在车辆行驶过程中, 由于超车、变换车道等原因会出现 S 行走现象; 司机在驾驶过程中可能会出现违反交通规则的情况, 例如在道路中间直接掉头行驶、单行线逆行等, 这些都会影响选择的正确性并引起误差。

5 路径规划算法

路径规划是车辆导航系统必不可少的核心功能之一, 也是实现导航功能的前提条件。路径规划即帮助驾驶员在出行前或出行中规划行使路径的过程, 它所解决的主要问题是在给定的数字道路地图中寻找从出发地到目的地的最优路径。在路径规划中, 针对实际应用的不同要求, 可以采用不同的优化标准, 如最短行车距离、最少出行时间、最低通行收费等。而距离、时间、收费等信息都可以存储在数字道路地图的路段属性中。数字道路地图可以转化为带权有向图, 因此不论采用何种标准, 计算道路网络中两点之间的最优路径问题都可以归结为求带权有向图的最短路问题。即图论中的最短路问题。

一般, 最短路径算法有多种分类方式, 但总的来说, 根据算法中是否考虑了网络的时变状态变量, 可将其分为静态路径规划算法和动态路径规划算法。另外, 按照规划目的的不同, 路径规划又可分为多车辆路径规划和单车辆路径规划, 前者多用于车队调度和交通管制, 后者则广泛应用于各种导航系统。车辆定位导航系统的路径规划属于单车辆路径规划的范畴, 由于多车辆路径规划问题可由单车辆路径规划推演出来, 因此, 下面将针对单车辆路径规划问题介绍一些

路径规划算法。

5.1 经典的最短路径规划算法

从图论意义上讲,最短路径问题就是指在一个赋权图中,寻找两个指定节点 u_0 和 v 之间具有最小权的路。如果把权值看成是弧的长度属性(距离),那么目标路径就是从起点到终点的最短路径,这也是其名称的由来。解决最短路径问题已经有很多成熟的算法,其中以 Dijkstra 和 Floyd 算法为代表的图论方法得到了非常广泛的应用。

5.1.1 迪杰斯特拉(Dijkstra)算法

迪杰斯特拉算法是由荷兰数学家 E. W. Dijkstra 于 1959 年提出的一种适用于非负权值网络的单元最短路径算法,是目前求解最短路径问题的理论上最完备、应用最广的经典算法。这个算法是基于贪心策略的最短路径算法,它的主要思路是按照路径长度逐点增长的方法构造一棵路径树,从而得到从该树的根节点(指定节点)到其他所有节点的最短路径。因此,不仅可以找到最短的 (u_0, v) 路径,而且可以给出从 u_0 到图中所有节点的最短路径。其基本步骤如下:

(1) 设 $d(u_0) = 0$, 对所有节点 $w \neq u_0$ 来说, 设 $d(w) = \infty$, 并将 u_0 标号为 0, $t \leftarrow u_0$ 。 d 为 u_0 和 w 之间的权值(距离)。

(2) 按照每个未标号的节点 w 计算 $d(w)$, $d(w) = \min\{d(w), d(t) + l(t, w)\}$, $l(t, w)$ 表示点 t 到点 w 之间的权值(距离)。若 $d(w)$ 被修改了, 说明在当前得到的 u_0 到 w 的最优路径上 t 和 w 相邻, 用 t_w 记录下来。在所有 $d(w)$ 中选择一个最小的 $d(s)$, 即 $d(s) = \min\{d(w)\}$, w 未标号。将 s 标号为 $d(s)/t_w$, 表示节点 u_0 到 s 的最优路径的长度为 $d(s)$, 且 t_w 与 s 相邻。

(3) 若终点 v 已标号, 则停止。得到一条从 u_0 到 v 的最优路径, 否则 $t \leftarrow s$, 转向(2)再计算。

5.1.2 弗洛伊德(Floyd)算法

当需要求解图中所有节点对之间最短路径时, 可以轮流以图中的每一个节点为源点, 重复执行 Dijkstra 算法 n 次, 而 Floyd 算法可以直接求出图中所有节点对之间的最短路径和最短路径长度。算法的基本思想是: 设置一个 $n \times n$ 的方阵 $A^{(k)}$, 其中除对角线的矩阵元素都等于 0 以外, 其他元素 $A_{ij}^{(k)}$ ($i \neq j$) 表示从节点 v_i 到 v_j 的有向路径长度, k 表示运算步骤。初始时, 以任意两个节点之间的弧的权值作为路径长度, 即

$$A_{ij}^{(0)} = c(v_i, v_j) \quad (1.7-51)$$

以后逐步在源路径中加入其他节点作为中间节点。如果增加中间节点后, 得到的路径长度小于原来的路径长度, 则以此新路径代替原路径, 修改矩阵元素, 代入新的更短的路径长度。如果在第 k 步增加节点 v_k 作为中间节点, 对于图中每一条弧, 要比较从 v_i 到 v_l 的路径长度加上从 v_l 到 v_j 的路径长度是否小于原来从 v_i 到 v_j 的路径长度, 即 $A_{i,k}^{(k-1)} + A_{k,j}^{(k-1)} < A_{ij}^{(k)}$ 是否成立, 如果成立, 那么需要以此新值代替原值作为元素 $A_{ij}^{(k)}$ 的值, 否则, 保持原来的值, 即

$$A_{ij}^{(k)} = \min(A_{ij}^{(k-1)}, A_{i,k}^{(k-1)} + A_{k,j}^{(k-1)}), k = 1, 2, \dots, n \quad (1.7-52)$$

以此类推, 经过 n 次计算和比较, 最后求得的就是从 v_i 到 v_j 的最短路径, $A_{ij}^{(n)}$ 就是从 v_i 到 v_j 的最短路径长度。从上式可知, $A_{ij}^{(0)}$ 是所计算网络的邻接矩阵, $A_{ij}^{(k)}$ 是从 v_i 到 v_j 的中间节点序号不大于 k 的最短路径长度。这样, Floyd 算法可以描述如下:

(1) 初始化方阵, 设置初值, 令 $A_{ij}^{(0)} = c(v_i, v_j)$, 同时设置一个路径方阵 P , P_{ij} 表示从 v_i 到 v_j 的最短路径, 若 $c(v_i, v_j) < \infty$, 令 $P_{ij} = (v_i, v_j)$;

(2) 对 $k=0, 1, \dots, n$, 判断是否有 $A_{i,k}^{(k-1)} + A_{k,j}^{(k-1)} < A_{ij}^{(k)}$ 成立, 若成立, 令 $A_{ij}^{(k)} = A_{i,k}^{(k-1)} + A_{k,j}^{(k-1)}$, $P_{ij} = P_{ik} + P_{kj}$, 其中 $i=0, 1, \dots, n, j=0, 1, \dots, n$ 。

5.1.3 改进迪杰斯特拉(Dijkstra)算法

上文介绍的迪杰斯特拉(Dijkstra)算法将产生从原点到达其他各节点的最短路径。但在现行电子地图中, 网络模型的规模常常较大, 节点数多, 并且对网络模型的查询也要求实时性。因此, 迪杰斯特拉(Dijkstra)算法虽理论上可行, 但在实际应用中, 当网络模型中节点数和边数较多时, 算法的计算量太大, 时间花费多, 效率低下。因此, 需作进一步改进。由于 $d(w) = \min\{d(w), d(t) + l(t, w)\}$, w 节点是否在上次已经被算出最短路径未知, 当前节点 w 是否与节点 t 相连也未知, 也就是 $l(t, w)$ 未知, 这时 $d(t)$ 是已知的, 故本次计算的 $d(w)$ 到底是不是 ∞ , 取决于上一步 $d(w)$ 数值和 $l(t, w)$ 的数值, 从表达式可以看出, 只要这两个数值不都是 ∞ , 本次计算的 $d(w)$ 就不会是 ∞ , 所以在上面迪杰斯特拉(Dijkstra)算法的实现步骤第(2)步时, 先判断一下, 只要原来的 $d(w)$, $l(t, w)$ 的数值中至少有一个不是 ∞ , 才进行下面的计算 $d(w) = \min\{d(w), d(t) + l(t, w)\}$, 这样就保证了当预见 $d(w)$ 是 ∞ 时, 不对它进行计算, 避免了大量无效的计算, 提高了搜索效率。

5.2 启发式搜索算法

5.2.1 A* 算法

A* 算法是一种启发式搜索算法。启发式搜索是基于知识的搜索策略, 即从初始状态和当前状态到目标状态搜索时具有与步骤数或费用相关的信息。基于启发式搜索的最短路径算法有 Costed 算法、分支界定法、限制搜索区域法、A* 算法等。目前在路径优化领域最流行的启发式搜索算法是 A* 算法, 它对实现道路网络的最佳优先搜索极为有效。该算法在选择下一个被检查的节点时, 对当前节点距离终点的长度进行估计, 评价其处于最优路径上的可能性量度, 这样就可以首先搜索可能性较大的节点, 从而提高搜索效率。

对节点 v 引入估价函数 $f(v)$, 定义为

$$f(v) = g(v) + h(v) \quad (1.7-53)$$

式中: $g(v)$ 为从原节点到当前节点的实际费用; $h(v)$ 为从当前节点 v 到目标节点最少费用路径的估计。

对估计函数 $f(v)$, 选择不同的定义可以得到不同的算法。如果选择最短行驶路径, 可得估价函数

$$f(v) = g(v) + h(v) = \sum_{i=1}^v r(i) + d(v) \quad (1.7-54)$$

式中: $r(i)$ 为道路 i 的长度; $d(v)$ 为当前节点 v 到目标节点的直线距离。

如果选择最短行驶时间, 可得估价函数

$$f(v) = g(v) + h(v) = \sum_{i=1}^v \frac{r(i)}{v(i)} + \frac{d(v)}{V'} \quad (1.7-55)$$

式中: $v(i)$ 为道路 i 的最大行驶速度; V' 为估计的最大行驶速度。

总之, A* 算法的目标是使 $f(v)$ 最小化, 从而获得最优的路径。

A* 算法的搜索步骤如下:

(1) 给原节点标记,对它的没有标记的子节点进行扩展。

(2) 对每一个子节点计算评价函数值,按评价值的大小进行排列,找出评价值最小的节点,并给它做标记,如果当前节点就是目标节点,则停止搜索。

(3) 否则,对最新被标记的节点进行第(2)步处理,并记录最短路径。

5.2.2 A* 算法的改进

A* 算法是利用对问题的了解和对问题求解过程和解的了解,寻求某种有利于问题求解的启发信息,从而利用这些启发信息去搜索最优路径。但是,启发性信息是人为加入的,有很大的主观性,直接取决于操作者的经验,对于不同情形要用不同的启发信息和启发函数,且它们的选取难度比较大。

如果对 A* 算法中的最小费用估计函数进行如下修改,就可以得到改进的 A* 算法,即最佳邻点启发式搜索(Best Neighbor Heuristic Search)算法,简称 B* 算法。该算法利用与当前节点 v 相邻的所有节点 w 定义新的最小费用估计函数 $h'(v)$

$$h'(v) = \begin{cases} 0 & w = t \\ \min \{c(v, w) + e(w, t) \mid (v, w) \in A\} & w \neq t \end{cases} \quad (1.7-56)$$

式中: A 为路网的弧集;节点 w 是 v 的后继节点; $c(v, w)$ 为弧 (v, w) 的权值; $e(w, t)$ 为 w 到终点 t 的费用估计。

由于 B* 算法扩展的所有节点都可由 A* 算法扩展,但反之不然,因此在理论上具有更高的搜索效率,但同时也付出了增大运算量的代价。

5.3 其他最优路径规划算法

5.3.1 双向搜索算法

双向搜索算法是指从原节点向目标节点计算最优路径(向前搜索),同时从目标节点向源节点计算最优路径(后向搜索),根据一定规则在前向和后向搜索之间迅速切换。前向和后向搜索算法可以采用一种单向搜索算法,如迪杰斯特拉算法或 A* 算法。实现双向搜索需要两个条件:首先需要一个停止搜索的标准;其次是前向和后向搜索的转换标准。双向搜索算法至少可以减少搜索空间 50%,算法的运行时间也比非双向搜索少得多。但是在最坏情况下,如采用了不正确的搜索条件时,可能导致双向搜索的工作量是单向搜索工作量的两倍。确定搜索条件一般是根据实际经验而定,因此采用合适的经验条件是相当重要的。

5.3.2 基于分层地图的搜索算法

从 Dijkstra 算法的时间复杂度分析可以看出,路网图的规模是影响最优路径搜索时间的主要因素。如果用合理的方法减少搜索所涉及的顶点和弧的数量,将会使路径规划获得有效的加速。采用基于多层地图的分级搜索技术可以实现对路径搜索空间的控制。基本思想是将道路网用高低两种分辨率的电子地图表示,首先在低分辨率图层中进行全局搜索以获得大致的目标路径,然后用该路径将高分辨率图层分解为一系列局部搜索空间进行搜索,并将获得的局部最优路径合并在一起得到最终的目标路径。

分层搜索算法是将道路网根据通行能力、道路宽度、连接关系等构成多个道路网,这多个道路网的集合构成整个道路网,每个道路网具有某种相同的属性。分层搜索算法就是根据起始点和终止点所在的网层,在特定的网层按某种搜索算法进行搜索,从而提高了搜索效率。

5.3.3 分区域搜索算法

分区域搜索算法的思想是首先对电子地图数据库进行预处理,按照一定的规则和自然地理分布划分出各区域,计算各区域进出节点的能力和相应区域内的最优路径,并存储这些信息。然后再实时地根据起始点和终止点的位置,计算到最近区域进出点的最优路径,并与预先存储的区域最优路径连接形成完整的最优路径。这种算法依赖于相应的电子地图数据库,需要进行数据预处理和额外的存储空间,但实时运行中的效率比较高。

5.3.4 用于最优路径规划的改进遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种全局意义上的自适应搜索技术,它的得来是受启发于自然界的优胜劣汰规则及遗传学原理,其突出优点在于包含了与生物遗传和进化很相似的步骤,同时,它还具有本质的并行计算的特点。它采用从自然选择机理中抽象出来的几种算子对参数编码字符串进行操作。这种操作是针对多个可行解构成的种群进行,在其世代更替中可以并行地对参数的不同区域进行搜索,保证 GA 能搜索到问题解空间的每一个点,并且只要遗传搜索中的每一代都包含上一代的最优个体,则搜索便会收敛到全局最优解。

用遗传算法解决路径优化问题主要在于如何将拓补网络中的路径编码成染色体。有人提出了一种防止初始种群出现断路和环路的编码方式,并采用了一种先变异后交叉的遗传算法;有人提出给予优先权的编码方式,其交叉操作采用的是 Syswerda 方法,变异操作则通过随机变换两个位置点内容的方式进行;还有学者提出基于基因限制的编码方式,其交叉操作采用一点随机交叉方法,并针对交叉后可能出现的环路问题进行了处理,变异操作则通过随机选择一点进行变异,并针对变异后可能出现的断路问题进行了处理。由于改进遗传算法正处于发展和研究阶段,因此算法尚未形成统一的思路脉络,它只是为解决实际的路径规划问题提供了新的解决途径。

6 智能交通系统中的移动通信

6.1 移动通信概述

凡是通信双方至少一方处在运动状态下的通信,均可称为移动通信。因为至少一方处于运动之中,所以只能使用无线电进行通信,这样的通信系统称为移动通信系统。移动通信发展进程大致分为 4 个阶段:

第一阶段:20 世纪 20~50 年代初,移动通信主要用于舰船和军用,采用短波频段和电子管是这一阶段的特征。这一阶段末才出现 150MHz 的甚高频单工汽车用移动电话系统,它采用的是人工切换频率和人工交换机制,接续慢、操作不方便。

第二阶段:20 世纪 50~60 年代,采用 150MHz 甚高频,并开始使用 450MHz 频率,设备由电子管向半导体过渡,使得移动台向小型化迈进了一步。在美国和日本,移动通信开始用于公安、消防、出租汽车以及调度等方面。此阶段的交换制度由人工交换发展到用户直接拨号的专用自动交换。

第三阶段:20 世纪 70 年代。在这一阶段中,移动通信发展又有一个飞跃。主要表现在:

(1) 人们开始使用 800MHz 频段,包括对该频段的电波传播测试研究和对设备的研制。

(2) 集成电路应用于移动通信设备中。

(3) 美国贝尔实验室提出了蜂窝系统的概念和理论,并于20世纪70年代末进行了先进移动电话系统(Advanced Mobile Phone System, AMPS)的试验。

(4) 移动通信设备(特别是电台和手持机)的重量、体积和功耗大大降低。

第四阶段:20世纪80年代以后。由于大规模、超大规模集成电路和微处理机、微计算机的大量应用,移动通信向着范围更加广泛、种类和形式更加多样的方向发展。系统容量扩大,业务种类增多,信息传输及时,设备在小型化、自动化、智能化和程控化上迈进了一大步,移动通信得到了前所未有的发展。

6.2 移动通信的分类方法

移动通信的分类可按不同的要求、内容、特点、服务对象、性质和使用场合等进行。

按工作方式分为单工制(又分同频单工和异频单工)、半双工制和全双工制。

按使用地域分为陆上移动通信、海上移动通信和空中移动通信。

按基地台的网络组成可分为线状、块状和混合结构。

按使用性质分为公用移动通信、专用移动通信和特种移动通信系统,也分为民用移动通信和军用移动通信。

按服务区域分为大区制、小区制、微小区(微微小区)制和混合制。

按用户容量分为大容量、中容量和小容量,结合服务区域则有大区小容量和小区大容量等。

按业务种类和性质分为移动无线电话系统、指挥调度系统,也可分为专用电话通信和电话、数据兼有的通信,甚至还可包括图像传输。

按控制方式分为集中式控制和分散式控制。

6.3 移动通信在智能交通系统中的应用

随着汽车的大量使用,对道路交通管理的要求越来越高。应用现代通信技术,使道路交通智能化,是致力于智能交通系统研究和开发者们共同的奋斗目标。为了实现道路交通的智能化,研究者者们已经做了大量的研究工作,如:不停车自动收费、车队间的通信、信标、调频FM广播、地理信息系统等。无论实现哪个方面的交通管理功能,只要需要与行驶中的车辆传递和交换信息,都必须采用无线通信方式。可见,要研究和开发智能交通系统,必须涉及无线通信技术的应用。

所谓无线通信,就是在发送端将待传的信息调制到无线电频率上,由天线将信号发射到空间(无线信道),信号以电磁波的形式在空间传播。而在接收端,由天线将空中的电磁波信号接收,再由接收设备将已调制的信号解调,还原成原始信息。由于无线通信的信道是空间,不像有线通信那样需要电缆、光纤等作为连接收发信号设备的信道,所以无线电通信方式允许终端移动。要实现先进的智能交通系统,仅仅有一些局部的通信是远远不够的。由于智能交通管理中心需要与行驶中的车辆交换大量的、实时的、图文声并茂的多媒体信息,如导航信息、路况信息、交通流量信息、危险警告信息、紧急情况通报等,所以智能交通系统需要利用最先进的通信技术建立道路与车辆为一体的通信系统。智能交通系统可以应用现代的移动通信公网进行通信,也可以组建智能交通系统的通信专网。

根据移动通信的特点与实现方式,在车辆定位系统中应

用的移动通信可归纳为:常规通信、集群通信、蜂窝通信、无线数据广播、专用数据通信、卫星通信等。

6.3.1 常规通信网数据传输

常规通信方法是建立一个管理中心, M 个用户公用一个或多个信道,系统一旦设定完毕,各用户仅能利用自己的信道进行数据传输,在该方式下,移动车辆与管理中心的空中接口采用TDMA方案,如图1.7-22所示。可用于连续的动态跟踪。



图 1.7-22 TDMA 方案

基于常规通信网进行数据传输组成的车辆定位系统作用范围与信道的频段、中心站天线高度、发射功率等因素有关。

6.3.2 集群电台通信系统

集群系统是移动通信专用网,它采用大区联网方式工作。集群系统的主要优点是共用频率资源,共享覆盖区,共同分担建网费用。由于采用大区联网方式,因而可得到较宽的业务覆盖区。

集群系统的分类方法有多种,按照信令类型分有模拟信令、数字信令及混合信令系统;按照信令方式分有共路信令方式和随路信令方式;按照话音分有数字集群、模拟集群;按控制方式分有集中控制、分散控制等。目前较为广泛使用的为集中控制方式的模拟集群系统,信令有MPT-1327标准的,也有非公开标准的。

集群系统比较适用于已经建有集群通信网,且冗余频率资源比较多,业务覆盖区域要求比较大的GPS定位管理系统。但是,由于集群系统不是单为GPS定位管理而建,就有一个业务分配的问题。如果所有信道都随机分配给GPS业务和非GPS业务,在两者业务都繁忙时,就会发生互相影响。如果拨出一部分信道给GPS信息传输专用,就和常规无线电台无多大差别。而且,由于集群系统信令传输要占去相当长时间,每一个频道的利用率必然要低于常规无线电台,目前实际能做到的仅是1~2辆/s的巡检速率,大大低于常规无线电台。

实践表明,在集群系统留给GPS定位信息传输可用的信道不多的情况下,这种传输方式并不适宜于较多车辆的GPS定位传输系统应用。并且此种传输系统的成本亦要比常规无线电台传输方式高得多。

6.3.3 GSM公用移动通信网通信系统

由于GSM数字公众移动通信网覆盖范围特别广,系统可靠性高(由于GSM网络本身具备完整数据校验错包重发机制),控制中心站建站方便(不需建高的铁塔)等优点,它受到许多用户的青睐。

利用GSM网来传输GPS信息的系统有人简称为“双G”系统,它是利用移动通信的短消息服务功能来实现GPS信息传输的。由于短消息服务是GSM中唯一不要求建立一端路径的业务,而且它是通过信令控制信道进行信息传输的。在仅有话音传输时,信令信道十分空闲。据统计,信令信道通常的时间占用率小于2%。这就为利用短消息服务传输GPS信息提供了良好的条件。

它可采用二种工作方式:第一种是“点对点”工作方式。即发站和收站都用1个手机(或手机模块),发信站手机将包括GPS信息在内的短消息和要发往的目的站一同发

给短消息服务中心 (SMSC), 再由 SMSC 转发给收站手机, 由它将收到的短消息送至监控中心进行处理。第二种是“点对点”的工作方式。即发站用一手机发送 GPS 信息, 由 SMSC 将收到的信息由 DDN 专用电路传送至监控中心进行处理。

显然“点对点”工作方式仅适用于移动终端数较少的情况, 而且, 这种工作方式有时延时会相当长, 令人难以接受。“点对中心”工作方式则可适用大容量移动终端的情况。此种通信方式所造成的时间延时要小得多, 大多数情况下, 其延时在 2~10s 范围内, 多数用户可以接受。

由于 GSM 蜂窝网的每一个基站的信令信道都可以为多个移动终端迅速传送短消息。每一个基站只需管理它的一个很小服务区内的车辆, 而一个 GSM 蜂窝网, 通常都有很多个基站。显然, 系统可以容纳的移动终端数可以很大。事实上, 蜂窝 GSM 网就是在原有时分多址的基础上增加了空分多址能力, 它的容量大大扩充了。

利用 GSM 公众网的优点, 除了服务范围特别广以外, 它还不需要在监控中心建高大的铁塔。它真正做到了数话兼容, 因为它在传送短消息的同时, 仍可以通话。另外, 由于利用了短消息服务, 使 GPS 定位管理系统可以增加许多为用户服务的功能。

“双 G”系统目前存在的主要缺点是: 系统运营费用较高, 对那些需要经常不断发送定位信息的系统, 难以承受。另一个缺点是, 对某些系统来讲, 延时较长仍是一个问题。

6.3.4 通用分组无线业务

通用分组无线业务 (General Packet Radio Service, GPRS) 是在 GSM 网上开发的针对突发性数据分组传送的一种业务, 其业务种类与短信息业务类似, 提供两类业务: 点到点业务和一点到多点业务。它与 GSM 网络交换方式不同, 属于包交换方式的数据通信系统。GPRS 系统数据传输速率可高达 115bit/s, 而其链路建立时间非常短, 可小于 1s。具有“永远在线、高速传输、快速登录、流量计费”等优点, 因此, 特别适用于像 GPS 系统那样突发性数据的应用。

6.3.5 蜂窝数字分组数据通信

蜂窝数字分组数据 (Cellular Digital Packet Data, CDPD) 以 800MHz 模拟蜂窝 AMPS 移动网为基础, 与 AMPS 公用移频段, 频宽为 30kHz。它使用蜂窝系统的空闲话音信道传送数据, 也可以制定一个专用信道传送数据。其突出特点是采用开放的 TCP/IP 协议, 应用软件交易开发, 便于用户使用。CDPD 适用于短的突发性信息, 以及速率低于 19 200kbit/s 低、中速率业务。

利用该技术也可以在 800MHz 频段上建立专门的只传送数据的 CDPD 网。CDPD 网投资少, 效益高, 其通信性能优于电路交换型数据传输, 而成本和覆盖范围又优于专用无线分组网。

6.3.6 短波电台通信方式

对于在丘陵、山区或 GSM 网未到达的偏远地方, 用短波电台传输 GPS 信息是一种较好的选择。由于短波通信存在严重的电波衰落现象, 因而它的允许传输速率较低, 一般可用的范围是 300~600bit/s。因而每个频点内允许使用的车辆数较少。

6.3.7 专用无线数据通信网

在国际上较流行的无线数据通信还有采用 Mobitex 和 Datatac 技术的专用分组无线网络。Mobitex 技术由 Ericsson 公司和瑞典电信联合开发, 用于美国的 RAM 网以及挪威、

芬兰、比利时、荷兰、澳大利亚、加拿大、法国、韩国等的移动数据网, 工作在 900MHz 或 450MHz 频段, 理论传输速率为 8kbit/s, 实际有效吞吐量为 2.4~4.8kbit/s。Datatac 技术由 Motorola 公司开发, 在美国的 Ardis 网及德国、英国、加拿大等的移动数据网中应用, 其理论传输率达到 9.6kbit/s 和 19.2kbit/s, 实际的吞吐量为 2~8kbit/s。

6.3.8 广播数据通信 (RDS)

RDS 首先由欧洲广播联盟和各个欧洲广播公司, 尤其是瑞典的 Telecom Radio (STR) 和 BBC 所定义, 是在调频立体声广播 (VHF/FM) 中利用附加信道来传送数据信息, 是对调频广播的重大发展。RDS 以 57kHz 为副载波, 带宽为 4.8kHz, 数据速率为 1.187 5kbit/s。

单向寻呼系统与广播数据系统类似, 只是工作频段与模式不同, 在车辆定位与导航中可以用于单向的实时交通信息发送。

6.4 卫星通信方式

卫星通信, 是指利用人造地球卫星作为中继站来转发或反射无线电波, 在两个或多个地球站之间进行的通信。这里地球站是指设在地球表面 (包括地面、海洋和低层大气中) 上的无线电通信站。而用于实现通信目的的这种人造地球卫星称为通信卫星。卫星通信是宇宙通信形式之一。

通常, 以宇宙飞行体或通信转发体为对象的无线电通信称为宇宙通信。它包括三种形式: ①地球站与宇宙站之间的通信; ②宇宙站之间的通信; ③通过宇宙站的转发或反射进行的地球站之间的通信。卫星通信是宇宙通信的第三种形式。

6.4.1 卫星通信系统的构成

卫星通信系统由空间分系统、通信地球站、遥测跟踪及指令分系统和监控管理分系统四大部分组成。其中遥测跟踪及指令分系统对卫星进行跟踪测量, 在卫星发射时, 控制其准确进入静止轨道上的指定位置, 并定期对卫星进行轨道位置的修正和卫星姿态的调整。监控管理分系统的任务是对在轨卫星业务开通前后进行通信性能的监测和控制, 例如对卫星转发器功率、卫星天线增益以及各地球站发射的功率、射频频率和带宽等基本参数进行监控, 以保证正常通信。空间分系统主要指通信卫星, 普通的通信业务是在通信卫星和通信地球站之间完成的, 由发端地球站、上行传输路径、通信卫星转发器、下行传输路径和收端地球站组成。

6.4.2 卫星通信系统的特点以及应用

卫星通信作为现代化的通信手段之一, 与其他通信方式相比, 卫星通信具有以下特点:

(1) 通信距离远, 且费用与通信距离无关。利用静止卫星, 最大的通信距离可达 18 000km 左右, 在卫星的可视范围内的地球站与卫星之间的信号传输满足技术要求, 通信质量便有了保证, 地球站的建设成本不因通信站之间距离远近、两站之间地面上的自然条件恶劣程度而变化。显然在远距离通信上, 卫星通信比微波接力、电缆、光纤、短波通信有明显的优势。

(2) 覆盖面积大, 且便于实现多址连接。通信卫星可视区达全球表面的 42.4%, 在这个大面积覆盖区域内, 卫星以广播方式工作, 而不是“点对点”通信, 所有地球站可共用一颗卫星实现站与站间的双边或多边通信, 卫星通信的这种能同时实现多方向、多地点通信能力, 称为“多址连接”。这个特点是卫星通信系统突出的优点, 它为卫星通信网络的组成提供了高效率 and 灵活性。

(3) 通信频带宽, 传输容量大, 能传输的业务类型多。通信卫星的射频采用 300MHz 以上的微波频段, 可供使用的频带很宽, 加上大功率卫星技术的发展和新技术的不断更新, 卫星通信容量越来越大, 传输业务类型越来越多样化;

(4) 机动灵活。卫星通信不仅能用于大型固定地球站之间的远距离通信, 而且可以在车载、船载、机载等移动地球站间进行通信, 甚至还可以为个人终端提供通信服务;

(5) 通信线路稳定可靠, 传输质量高。卫星通信的电波主要在大气层以外的宇宙空间中传输, 而宇宙空间接近真空状态, 可看作是均匀介质, 电磁波传播特性比较稳定。同时, 它不易受到自然条件和人为干扰的影响, 因而传输质量高。

由于卫星通信具有上述这些突出的优点, 二十多年来得到了迅速的发展, 应用范围极其广泛, 不仅用于传输电话、电报、传真、数据等, 而且特别适用于民用广播电视节目的传送。

当然, 卫星通信在技术上还存在一些问题和缺点:

- (1) 要有高可靠、长寿命的通信卫星。
- (2) 静止卫星的发射与控制技术比较复杂。
- (3) 静止卫星通信具有较大的信号传输延迟和回声干扰。
- (4) 存在星蚀和日凌中断现象。

此外, 对于静止卫星通信系统来说, 地球高纬度地区的通信效果不好, 两极地区存在通信盲区; 地面微波系统与卫星通信系统之间存在相互的同频干扰。

6.5 专用短程通信技术

专用短程通信系统采用无线通信技术, 由车载单元、路

旁单元、专用短程通信协议以及后台计算机网络组成, 在智能交通系统中实现路—车之间信息传输、交互的通信系统。

车载单元主要由车载机和电子标签组成, 电子标签中存储了该车的有关信息, 如车号、车型、所有者等等。路旁单元又称为车道单元、车道设备, 主要是车道通信设备—读写器, 包括车道天线和天线控制器。专用短程通信系统主要是利用专用短程通信技术, 通过路旁单元的信号发射和接收装置识别通过车辆的相关信息, 自动对车辆进行身份鉴别、实时监控、动态引导等智能化管理, 完成车辆相关信息的动态采集工作。

专用短程通信协议是 DSRC 的基础, 目前欧洲、日本和美国都建立起了自己的 DSRC 标准。相对于开放系统互联体系七层协议模型而言, 专用短程通信规范一般按物理层、数据链路层和应用层三个层次制定。

物理层 (Physical Layer): 规定了无线通信标准, 包括载波频率、上下行数字编码方式、信号调制方式等。其中载波频率是一个关键参数, 它造成了目前世界上微波专用短程通信协议及专用短程通信系统的主要差别, 就目前发展趋势而言, 基于 5.8GHz 的微波通信将成为未来 DSRC 的唯一标准。

数据链路层 (DataLink Layer): 定义数据链路通信协议, 制定了介质访问和逻辑链路控制方法。定义了进入共享物理媒介、寻址和出错控制的操作。

应用层 (Application Layer): 提供了一些专用短程通信应用的基础性工具。应用层中的过程可以直接使用这些工具, 例如通信初始化过程数据传送和擦去操作等。另外, 应用层还提供了支持同时多请求的功能。



第8章 电动汽车

1 概述

电动汽车是以电力作能源、由电动机驱动的机动车辆。电动汽车在系统结构和工作原理上完全不同于燃油汽车,它不仅是一辆车,而且是实现清洁、节能、高效道路运输的一个全新的系统。电动汽车可分为纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车。纯电动汽车是真正的“零污染”排放车辆,但是价格过高,续驶里程不能满足需求。混合动力电动汽车是目前新能源车辆的主流,并获得了大范围的商业成功,国内外几乎所有的汽车公司都在积极研发各自的混合动力汽车产品。燃料电池电动汽车是汽车节能与环保技术的最终发展方向,各大汽车公司纷纷结成联盟,以期优势互补,共同开发未来的清洁环保车辆。

1.1 关键技术

电动汽车涉及汽车、电气、电子、信息和化学等领域,关键技术包括电源技术、车身设计、电力驱动、能量管理系统和系统的优化及将这些技术的整合。

1.1.1 车身设计

生产电动汽车有两种基本方法,一种是改装,另一种是专门设计制造。对于改装的电动汽车,燃油车中原来安装发动机及相关组件的部位由电动机、功率转换器和电池所取代,但这种方法只适合小批量生产,已逐渐被淘汰。目前,现代电动汽车大部分是为特定目的而设计的,可以灵活地调整和整合各子系统,使之有效地工作。

在设计电动汽车时,影响整车整体性能(如续驶里程、爬坡能力、加速能力及最高车速)的参数需要进一步改进,比如减轻整车的重量、降低风阻系数和减小滚动阻力等。汽车的重量直接影响整车性能,特别是续驶里程和爬坡能力,可采用铝和合成材料作车身和底盘来减轻汽车的自重。车身风阻系数越低,汽车行驶时的空气阻力就越小,因而可以大大提高汽车在公路上行驶的续驶里程。采用流线型的车头和车尾,隐藏式和平坦的车身底部可减小空气阻力。当汽车以中低速行驶时,采用滚动阻力系数小的轮胎可以有效地减小汽车的滚动阻力,也有利于延长汽车在市区内行驶的续驶里程。

1.1.2 电力驱动

电力驱动子系统的主要任务是把电能转换为机械能,使汽车能克服空气阻力、滚动阻力和加速阻力而前进。现代电动机的高转矩、低转速和恒功率、高转速的工作范围可以通过电子控制来获得,使得电动汽车的驱动系统设计更加灵活多样。可采用单电动机或多电动机驱动,可选用或不用变速器,可选用或不用差速器,可选用轴式电动机或轮边电动机等。

电力驱动系统由电气系统、变速装置和车轮组成,其中变速装置是选用的。电力驱动系统的关键是电气系统。电气系统由电动机、功率变换器和电子控制器等组成。对电动机驱动系统的要求如下:

(1) 恒功率输出和高的功率密度。

(2) 在汽车起步和爬坡时具有低速—高转矩的输出特性,以及汽车巡航时的高速—低转矩特性。

(3) 具有较大的转速范围足以涵盖恒转矩区和恒功率区。

(4) 快速的转矩响应特性。

(5) 在转矩/转速特性的较宽范围内具有高的效率。

(6) 再生制动时的能量回收效率高。

(7) 坚固,能在不同的工作条件下可靠地工作。

(8) 成本低廉。

为了满足这些特定的要求,需要在驾驶模式和系统仿真的基础上,对驱动电动机的额定功率和转矩/转速特性进行确定。

随着先进的电动机、功率电子、微电子技术及控制策略的发展,现在越来越多的电动机可用于电动汽车。由于直流电动机在低速时的转矩很高且容易控制,所以早期的电动汽车都采用直流电动机驱动系统,但直流电动机的换向器和电刷需要定期维护。目前,随着技术的发展,许多先进的电动机驱动技术显示出优于直流电动机的性能,它们在高效率、高功率密度、有效的再生能量回馈、坚固性、可靠性和免维护性等方面具有明显的优势。在这些电动机中,矢量控制的感应电动机最受欢迎,技术也最成熟,但它的缺点是在小负荷范围内效率低。永磁无刷电动机比其他电动机的效率和功率密度都高,但它在高速恒功率工作区很难进行弱磁控制。永磁混合式无刷电动机是一种特殊的永磁无刷电动机,这种电动机加入了励磁绕组,永磁磁通分量和励磁磁通分量在气隙中叠加形成气隙磁通,气隙磁通可通过调节励磁电流来控制,因而这种电动机在宽转速范围内具有最佳效率。开关磁阻电动机应用在电动汽车上是很有前途的,因为它自身的结构和相应的功率转换器的结构都非常简单可靠,且它的转速范围宽,散热能力强,能在各种环境下工作,并且再生制动的能量回收效率高,但必须解决转矩脉动和噪声问题。

1.1.3 能源系统

能源系统是限制电动汽车一次充电的续驶里程和初始价格的主要原因。电动汽车对能源系统的要求如下:

(1) 高的比能量和能量密度。

(2) 高的比功率和功率密度。

(3) 快充和深放电的能力。

(4) 寿命长。

(5) 自放电率小,充电效率高。

(6) 安全性好且成本低廉。

(7) 免维修。

(8) 对环境无危害,可回收性好。

目前,还没有一种能源能完全满足上述要求,选用某一种蓄电池只能满足上述部分要求。铅酸电池具有成本低廉和比功率高的优点,但它的寿命短且比能量低;镍氢电池的比能量高,但价格较昂贵;锂离子电池和锂聚合物电池,在现代电动汽车中的应用将会有很好的前景;超级电容器和超高速飞轮,由于其高的比功率,也将有希望用于电动汽车;燃料电池能从根本上解决电动汽车续驶里程短的

问题，被公认为是目前电动汽车最重要的能源之一，若燃料电池能大大降低其初始成本，在下一代的路面交通工具中，它将最有希望和现在的燃油汽车相媲美。

为了解决一种能源不能同时提供足够高的比能量和比功率这个问题，可采用多能源系统，即混合动力系统提供动力。对于采用两个能源的混合动力而言，可以选用一个能源具有高的比能量，而另一个能源具有高的比功率。有蓄电池和蓄电池相结合的混合动力，也有采用蓄电池和超级电容器，蓄电池和超高速飞轮及燃料电池和蓄电池相结合的混合动力。内燃机和蓄电池结合是混合动力的一种特例，其中燃油的高比能量能保证汽车足够长的行驶里程，而蓄电池的高比功率有利于提高汽车的加速性能并减少废气排放。

1.1.4 能量管理系统

能量管理系统的目的就是要最大限度地利用有限的车载能量，增加行驶里程。智能能量管理系统采集从各个子系统输入的传感器信息，这些传感器包括车内外气温传感器、充/放电时电源电流和电压传感器、电动机电流和电压传感器、速度和加速度传感器及车外环境和气候传感器等。能量管理系统能实现以下基本功能：

- (1) 优化系统的能量分配。
- (2) 预测电动汽车电源的剩余能量和还能继续行驶的里程数。
- (3) 提供最佳的驾驶模式。
- (4) 再生制动时，合理地调整再生能量。
- (5) 根据车辆的行驶气候条件，调整其温度控制方式。
- (6) 根据外部光照条件，自动调节电动汽车的灯光照明强度。
- (7) 分析电源尤其是蓄电池的工作历史。
- (8) 诊断电源错误的工作模式和有缺陷的部件。

智能能量管理系统与电动汽车导航系统相结合，将能随时根据交通情况修改剩余行驶里程的预测，制定最节能的行驶路线，以及发现最近的充电站。智能管理系统如同电动汽车的大脑，同时具有功能多、灵活性好、适应性强的特点，能智能地利用有限的车载能量。

1.1.5 系统优化

电动汽车的性能受多学科相关因素的综合影响，需要通过系统优化，如计算机仿真技术，来改进电动汽车的性能和降低车辆的成本。由于整个电动汽车系统由不同的子系统组成，并通过机械、电气、控制及热等连接方式连接在一起，所以仿真应在混合信号的概念基础上进行。不同的子系统之间有许多协定，系统优化应在系统上进行，对于首选的系统标准，通常要用数字迭代法。

系统水平上的仿真和电动汽车的优化应考虑下列关键问题：

- (1) 电动汽车的各子系统之间的相互作用会影响整车的性能，应分析和考虑这些相互作用的重要性。
- (2) 模型的精确性通常与模型的复杂性一致，与其可用性相矛盾，应综合考虑模型的精确性、复杂性、可用性及计算时间。
- (3) 在设计电动汽车时，通常系统的电压会引起一些相互矛盾的问题，优化系统时应在系统水平上综合考虑以下问题：蓄电池的质量、驱动电动机的电压和额定电流、加速性能、续驶里程及安全性能等。
- (4) 当采用多能源系统提高电动汽车的续驶里程时，应根据整车性能和价格来优化相应的混配比。
- (5) 传动比对整车性能和操纵性影响很大，需要通过驱

动力平衡图，并采用迭代优化法来确定最优减速比。

1.2 发展趋势

(1) 纯电动汽车发展呈现出新特点。由于纯电动汽车的价格太高，行驶里程未能满足使用者的需求，所以纯电动汽车前景不被看好。但仍然有些研究机构，如美国国家实验室，还在继续进行纯电动汽车的先进驱动系统、先进电池及其管理系统等的深入研究。另外，小型、低速、特种用途的纯电动汽车也在不断发展。在日本，纯电动汽车与智能交通系统的组合，已成为目前电动汽车技术水平下实用化和商业化的新途径。

(2) 混合动力电动汽车商业销售业绩斐然。混合动力电动汽车既具有低排放、低油耗、低噪声等优点，又具有足够长的续驶里程和良好的动力性能，混合动力汽车技术也已日益成熟，并已经在市场上获得了成功。如日本丰田公司生产的 Prius 混合动力轿车已经在全球销售超过了 50 万辆，日本本田公司、日产汽车公司生产的混合动力电动汽车也已在市场上获得成功，这些都促使混合动力电动汽车仍将成为未来一段时间内最具商业价值的电动汽车，以及各国研发的热点。

(3) 燃料电池电动汽车前景仍被看好。几乎所有的国外大型企业集团全部参与燃料电池电动汽车的研发，并且纷纷组成强大的跨国联盟，如日本丰田公司与美国通用公司、日本东芝公司与美国国际燃料电池公司、德国宝马公司与西门子公司等。其中，以加拿大的巴拉德公司、美国的福特公司和戴姆勒—克莱斯勒公司的联盟最具代表性。该联盟投巨资开发生产电动汽车用燃料电池动力系统。这些企业联盟对燃料电池电动汽车的前景纷纷看好，并对其发展给予厚望。

1.3 国内外电动汽车标准

国内外电动汽车标准见表 1.8-1。

表 1.8-1	国内外电动汽车标准
GB/T 18332.1—2001	电动道路车辆用铅酸蓄电池
GB/T 18332.2—2001	电动道路车辆用金属氢化物镍蓄电池
GB/T 18333.1—2001	电动道路车辆用锂离子蓄电池
GB/T 18333.2—2001	电动道路车辆用锌空气蓄电池
GB/T 18384.1—2001	电动汽车 安全要求 第 1 部分：车载储能装置
GB/T 18384.2—2001	电动汽车 安全要求 第 2 部分：功能安全和故障防护
GB/T 18384.3—2001	电动汽车 安全要求 第 3 部分：人员触电防护
GB/T 18385—2005	电动汽车动力性能试验方法
GB/T 18386—2005	电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法
GB/T 18387—2008	电动车辆的电磁场发射强度的限值和测量方法 带宽 9kHz~30MHz
GB/T 18388—2005	电动汽车定型试验规程
GB/T 18487.1—2001	电动车辆传导充电系统一般要求
GB/T 18487.2—2001	电动车辆传导充电系统电动车辆与交流/直流电源的连接要求
GB/T 18487.3—2001	电动车辆传导充电系统电动车辆与交流/直流充电机（站）
GB/T 18488.1—2006	电动汽车用电机及其控制器 第 1 部分：技术条件
GB/T 18488.2—2006	电动汽车用电机及其控制器 第 2 部分：试验方法
GB/T 19596—2004	电动汽车术语
GB/T 19836—2005	电动汽车用仪表

续表	
GB/T 4094.2—2005	电动汽车操纵件、指示器及信号装置的标志
GB/T 20234—2006	电动汽车传导充电用插头、插座、车辆耦合器和车辆插孔通用要求
GB/T 19750—2005	混合动力电动汽车 定型试验规程
GB/T 19751—2005	混合动力电动汽车 安全要求
GB/T 19752—2005	混合动力电动汽车 动力性能试验方法
GB/T 19753—2005	轻型混合动力电动汽车 能量消耗量试验方法
GB/T 19754—2005	重型混合动力电动汽车 能量消耗量试验方法
GB/T 19755—2005	轻型混合动力电动汽车 污染物排放测量方法
ISO 6469.1; 2001	电动道路车辆 安全要求 第1部分: 车载储能装置
ISO 6469.2; 2001	电动道路车辆 安全要求 第2部分: 功能安全方式和故障防护
ISO 6469.3; 2001	电动道路车辆 安全要求 第3部分: 人员触电防护
ISO 8713; 2001	电动道路车辆 词汇
ISO 8714; 2001	电动道路车辆 参考能量消耗量和续驶里程乘用车和新型商用车
ISO 8715; 2001	电动道路车辆 道路操纵特性
IEC 60718; 1997	电动道路车辆的供电设备
IEC 60783; 1984	电动道路车辆的电缆和连接器
IEC 60784; 1984	电动道路车辆用仪表
IEC 60785; 1984	电动道路车辆用旋转电机
IEC 60786; 1984	电动道路车辆用控制器
IEC 61382-1; 1996	电动道路车辆驱动用镍镉可充电电池和蓄电池 第1部分: 动态放电性能试验和动态耐久性试验
IEC 61851-1; 2001	电动道路车辆传导型充电系统 第1部分: 一般要求
IEC 61851-21; 2001	电动道路车辆传导型充电系统 第21部分: 电动车辆与直流/交流连接要求
IEC 61851-22; 2001	电动道路车辆传导型充电系统 第22部分: 电动车辆交流充电站
IEC 62196	插头、插座、车辆耦合器和车辆接口—电动车辆传导充电
SAE J551-5—1997	电动汽车电磁场强度(带宽 9kHz ~ 30MHz)的特性和测量方法
SAE J1495—2001	蓄电池火花延缓通风系统试验规程
SAE J1634—1999	电动汽车能量消耗和续驶里程试验方法
SAE J1654—1994	高压电缆
SAE J1666—1999	电动汽车加速、爬坡能力和减速试验方法
SAE J1673—1996	电动汽车高压电缆设计
SAE J1711—1999	混合动力汽车排放和能量消耗量试验方法
SAE J1715—1994	电动汽车术语
SAE J1718—1997	电动乘用车和轻型货车蓄电池充电期间氢气排放物的测量方法
SAE J1766—1998	电动和混合动力电动车辆蓄电池碰撞完整性试验推荐规程
SAE J1772—2001SAE	电动车辆传导充电连接器
SAE J1495—2001SAE	电动车辆感应充电连接器
SAE J1797—1997	电动车辆蓄电池组组装得推荐程序
SAE J1798—1997	电动车辆蓄电池组性能评价的推荐程序
SAE J2288—1997	电动车辆蓄电池组循环寿命试验
SAE J2289—2000	电驱动蓄电池包系统功能要求
SAE J2293.1—1997	电动汽车能量转换系统 第1部分: 功能安全和系统构造

续表	
SAE J2293.2—1997	电动汽车能量转换系统 第2部分: 通讯信号和功能要求
SAE J2344—1998	电动车辆安全导则
SAE J2380—1998	电动车辆蓄电池的振动试验
SAE J2464—1999	电动车辆蓄电池滥用试验
SAE J2574—2002	信息报告燃料电池电动汽车术语
SAE J2578—2002	燃料电池汽车一般安全的推荐规程
SAE J2600—2002	压缩氢气车辆燃料连接装置
SAE J2711—2002	大型混合动力汽车、传统汽车能量消耗及排气污染物试验方法推荐规程
JEVS C 601—2001	电动车辆充电用插头插座
JEVS Z 101—1987	电动车辆试验方法通则
JEVS Z 102—1987	电动汽车最高速度试验方法
JEVS Z 103—1987	电动汽车续驶里程试验方法
JEVS Z 104—1987	电动汽车爬坡能力试验方法
JEVS Z 105—1988	电动汽车能量消耗量工况试验方法
JEVS Z 106—1988	电动汽车能量消耗量等速试验方法
JEVS Z 107—1988	电动汽车电动机及控制器联合试验方法
JEVS Z 108—1994	电动汽车 续驶里程及能量消耗的测量
JEVS Z 109—1995	电动汽车 加速性能的测量
JEVS Z 110—1995	电动汽车 最大巡航速度的测量
JEVS Z 111—1995	电动汽车 参考能量消耗的测量(电池输出)
JEVS Z 112—1996	电动车辆爬坡试验方法
JEVS Z 901—1984	电动车辆 技术参数标准格式(主要技术参数表)
JEVS Z 804—1993	电动汽车 控制器、指示器和信号装置的标志
JEVS Z 804—1988	电动汽车术语 车辆
JEVS Z 801—1985	电动汽车术语 电机和控制装置
JEVS Z 805—1998	电动汽车术语 电池和充电器
JEVS Z 803—1986	电动汽车术语 电池
JEVS Z 806—1998	电动汽车术语 充电器
JEVS Z 802—1988	电动车辆 技术参数标准格式(主要技术参数表)
JEVS Z 807—1998	电动汽车 电动机及控制器联合驱动测量
JEVS Z 808—1998	电动汽车车上使用的等效电机的动力测量(扭矩和速度测量)
JEVS Z 901—1995	电动汽车铅酸蓄电池尺寸和构造要求
JEVS E 701—1994	电动汽车用镍金属混合密封蓄电池尺寸和构造
JEVS E 702—1994	电动汽车铅酸蓄电池的容量试验方法
JEVS D 001—1995	电动汽车铅酸蓄电池的能量密度试验方法
JEVS D 002—1999	电动汽车铅酸蓄电池的功率密度试验方法
JEVS D 701—1994	电动汽车铅酸蓄电池工况寿命试验方法
JEVS D 702—1994	电动汽车用镍金属混合密封蓄电池容量试验方法
JEVS D 703—1994	电动汽车用镍金属混合密封蓄电池能量密度试验方法
JEVS D 704—1997	电动汽车用镍金属混合密封蓄电池特殊功率和峰值功率密度试验方法
JEVS D 705—1999	电动汽车用镍金属混合密封蓄电池特殊功率寿命试验方法
JEVS D 706—1999	
JEVS D 707—1999	
JEVS D 708—1999	

续表	
JEVS D 709—1999	电动汽车用镍金属混合密封蓄电池放电容量试验方法
JEVS D 710—2002	电动汽车电池充电效率试验方法
JEVS D 711—2003	混合动力汽车用密封型 Ni-MH 电池容量试验方法
JEVS D 712—2003	混合动力汽车用密封型 Ni-MH 电池能量密度试验方法
JEVS D 713—2003	混合动力汽车用密封型 Ni-MH 电池输入及输出密度试验方法
JEVS G 101—1993	电动汽车 在经济充电站的快速充电系统的充电能力
JEVS G 102—1993	电动汽车 在经济充电站的快速充电系统使用的铅酸蓄电池
JEVS G 103—1993	电动汽车 在经济充电站的快速充电系统使用的充电接头
JEVS G 104—1995	电动汽车 在经济充电站的快速充电系统使用通讯协议
JEVS G 105—1993	电动汽车 在经济充电站的快速充电系统使用的连接器
JEVS G 106—2000	电动车辆感应充电系统一般要求
JEVS G 107—2000	电动车辆感应充电系统人工连接器
TG G101—1997	电动汽车用 AC 200V 充电系统
TG G102—2001	电动汽车充电设备安装要求
TG D001—1999	电动汽车用 VRL 蓄电池安全导则
TG Z001—1999	电动汽车充电信息安全显示导则
TG Z002—1999	电动汽车高电压部件安全显示导则
TG Z101—1999	电动汽车电能量测量方法
JIS D1301—2001	电动汽车续驶里程及燃料消耗率试验方法
JIS D0112—2000	电动汽车术语 车辆
JIS D0113—2000	电动汽车术语 电机和控制装置
JIS D0114—2000	电动汽车术语 电池
JIS D0115—2000	电动汽车术语 充电器
EN 1821. 1—1996	电驱动道路车辆 道路操纵特性试验方法 第 1 部分：纯电动汽车
EN 1821. 2—1999	电驱动道路车辆 道路操纵特性试验方法 第 2 部分：热电混合动力汽车
EN 1986. 1—1996	电驱动道路车辆 能量特性测量方法 第 1 部分：纯电动汽车
EN 1986. 2—1996	电驱动道路车辆 能量特性测量方法 第 2 部分：热电混合动力汽车
EN 1987. 1—1997	电驱动道路车辆 安全特殊要求 第 1 部分：车载储能装置
EN 1987. 2—1997	电驱动道路车辆 安全特殊要求 第 2 部分：功能安全方式和故障防护
EN 1987. 3—1998	电驱动道路车辆 安全特殊要求 第 3 部分：用户触电防护
EN 12736—2001	电驱动道路车辆 车载充电器充电过程中传播噪声 声音功率水平的测量
EN 13444. 1—2001	电驱动道路车辆 混合动力汽车排气测量 第 1 部分：热电混合动力汽车
EN 13447. 1—2001	电驱动道路车辆 术语
ECE R100	关于在结构和基本安全方面电动车辆形式认证的统一规定
ECE R83HEV	排气污染物测量补充规定
ECE R101HEV	能耗测量补充规定

2 纯电动汽车

2.1 基本结构

电动汽车具有区别于燃油汽车的特点：电动汽车的能量主要是通过柔性的电线连接而不是通过刚性联轴器和转轴传递的，因此，电动汽车各部件的布置具有很大的灵活性；电动汽车驱动系统的布置不同（如独立的四轮驱动系统和轮毂电动机驱动系统等），会使系统结构区别很大，采用不同类型的电动机（如直流电动机和交流电动机）会影响到电动汽车的重量、尺寸和形状；不同类型的储能装置（如蓄电池和燃料电池）也会影响电动汽车的重量、尺寸及形状；不同的补充能源装置具有不同的硬件和机构，例如蓄电池可通过感应式和接触式的充电机充电，或者采用替换蓄电池的方式，将替换下来的蓄电池再进行集中充电。

电动汽车系统可分为三个子系统，即电力驱动子系统、主能源子系统和辅助控制子系统。其中，电力驱动子系统又由电控单元、功率转换器、电动机、机械传动装置和驱动车轮组成；主能源子系统由主电源、能量管理系统和充电系统构成；辅助控制子系统具有动力转向、温度控制和辅助动力供给等功能。

在图 1.8-1 中，双线表示机械连接，粗实线表示电气连接，细线表示控制信号连接，线上的箭头表示电功率和控制信号流动的方向。根据从制动踏板和加速踏板输入的信号，电子控制器发出相应的控制指令来控制功率转换器的功率装置的通断，功率转换器的功能是调节电动机和电源之间的功率流。当电动汽车制动时，再生制动的动能被电源吸收，此时功率流的方向要反向。能量管理系统和电控系统一起控制再生制动及其能量的回收，能量管理系统和充电器一同控制充电并监测电源的使用情况。辅助动力供给系统供给电动汽车辅助系统不同等级的电压，并提供必要的动力，它主要给动力转向、空调、制动及其他辅助装置提供动力。除了从制动踏板和加速踏板给电动汽车输入信号外，方向盘输入也是一个很重要的输入信号，动力转向系统根据方向盘的角位置来决定汽车灵活地转向。

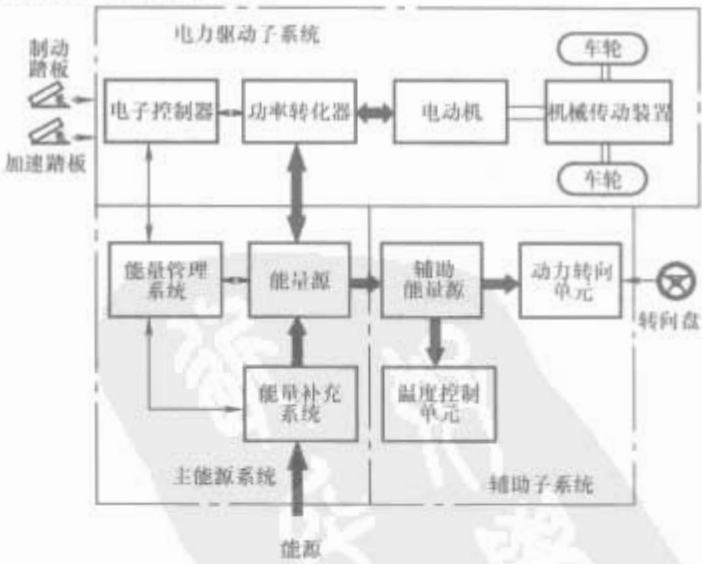


图 1.8-1 电动汽车的基本结构

2.1.1 驱动电动机和电力驱动子系统

驱动电动机是电动汽车的动力装置，这也是电动汽车与内燃机汽车的根本区别之处。现代电动汽车所采用驱动电动机主要是交流电动机、永磁电动机和开关磁阻电动机等，相应的功率转换器采用脉宽调制逆变器。机械变速传动系统一般采用固定速比的减速器或变速器与差速器。

一般要求电动机能够在电动汽车制动时实现再生制动，

可以回收10%~15%的能量。再生制动能量的回收有利于节能和延长电动汽车的行驶里程，这是电动汽车节能的重要措施之一。再生制动在内燃机汽车上是不能实现的。在电动汽车的制动系统中，还保存了常规的制动系统和ABS制动系统，保证车辆在紧急制动时有可靠的制动性能。

根据电力驱动系统的不同，电动汽车的结构分为以下六种不同形式，如图1.8-2所示。第一种类型如图1.8-2(a)所示，它是由发动机前置前轮驱动的燃油车发展而来的，由电动机、离合器、齿轮箱和差速器组成，离合器用来切断或接通电动机到车轮之间传递动力的机械装置，变速器是一套具有不同速比的齿轮机构，驾驶员可以选择不同的变速比把力矩传给车轮。在低速挡时，车轮获得大力矩低转速；在高速挡时，车轮获得小力矩高转速。汽车在转弯时，内侧车轮的转弯半径小，外侧车轮的转弯半径大，差速器使内外车轮以不同的转速行驶；如果用固定速比的减速器，去掉离合器，可以减少机械传动装置的重量，缩小其体积。图1.8-2(b)所示的是由电动机、固定速比的减速器和差速器组成的电力驱动系统。应该注意，这种结构的电动汽车由于没有离合器和可选的变速挡位，不能提供理想的转矩/转速特性，因而不适合于使用发动机的燃油汽车。图1.8-2(c)所示的这种结构与发动机横向前置、前轮驱动的燃油汽车的布置方式类似，它把电动机、固定速比减速器和差速器集成为一个整体，两根半轴连接驱动车轮。这种结构在小型电动汽车上应用最普遍。图1.8-2(d)所示的双电动机结构就是采用两个电动机通过固定速比的减速器分别驱动两个车轮，每个电动机的转速可以独立地调节控制，便于实现电子差速，因此，电动汽车不必选用机械差速器。电动机也可以装在车轮里面，称为轮毂电动机，可以进一步缩短从电动机到驱动车轮的传递路径，如图1.8-2(e)所示。为了将电动机转速降低到理想的车轮转速，可以采用固定减速比的行星齿轮变速器，它能提供大的减速比，而且输入和输出轴可以布置在同一条轴线上。图1.8-2(f)表示了另一种使用轮毂电动机的电动汽车结构，这种结构采用低速外转子电动机，彻底去掉了机械减速齿轮箱，电动机的外转子直接安装在车轮的轮缘上，车轮转速和电动汽车的车速控制完全取决于电动汽车的

转速控制。

2.1.2 车身及底盘

电动汽车已经具有各种车型，包括电动轿车、电动客车（微型、小型、中型和大型）、电动货车（微型、小型、中型和大型）及其他改装的电动车辆。为了适应城市、家庭、学校和服务行业的需要，电动汽车的车身造型，特别是微型电动轿车，已经有了多种多样丰富多彩的造型；这些造型中特别重视流线型，不仅使得电动汽车的车身造型更加具有特色，而且还使得车身的空气阻力系数大大降低。大多数电动汽车用复合材料来制造车身结构和车体内饰，有的豪华气派，有的简单朴实，并更加轻盈和美观。

动力电池组的质量大，所占据的空间大，为减轻电动汽车的整车质量，采用了轻质材料、碳纤维增强树脂和复合材料等制造车身和底盘部分总成，并采用三维挤压成型工艺制造出结构复杂、质量小、强度大和装卸动力电池组方便的车架，补偿因装动力电池组而增加的负载。在底盘的布置上，还要有足够的空间存放动力电池组，并且要求线路连接方便、充电方便、检查方便和装卸方便，能够实现动力电池组的整体机械化装卸。这就要求在电动汽车底盘的布置上打破传统的内燃机汽车底盘布置模式，加大承载空间的跨度和承载结构件的刚度，并且充分考虑防止动力电池组渗出的酸或碱等对底盘结构件的腐蚀等。在电动汽车上，多采用滚动阻力小的子午线轮胎，这种子午线轮胎的滚动阻力系数仅为0.005，使得电动汽车行驶时的滚动阻力大大降低。

2.1.3 主能源子系统

2.1.3.1 车载电源或储能装置

目前，在电动汽车上，一般以各种不同的蓄电池组成动力电池组作为动力源，用周期性的充电来补充电能。动力电池组是电动汽车的关键装备，它的重量、体积和储存的电能对电动汽车的性能起决定性影响，也是发展电动汽车的主要研究和开发的对象。经过科学家不懈的努力，电动汽车用电池经过了三代的发展，已取得突破性的进展。

第一代的电动汽车的电池都是铅酸电池，由于铅酸电池的比能量和比功率不能满足电动汽车动力性能的需求，进一步发展了阀控铅酸电池、铅布电池等，使铅酸电池的比能量有所提高。目前，它仍然能够作为电动汽车的电源。

第二代的高能电池有镍-镉电池、镍-氢电池、钠-硫电池、钠-氯化镍电池、锂离子电池、锂聚合物电池、锌-空气电池和铝-空气电池等多种电池。第二代电池的比能量和比功率都比铅酸电池高，大大提高了电动汽车的动力性能和续航里程。但第二代电池仍然是在电能-化学能-电能的化学反应过程中存储电能和供给电能，有一些特殊使用条件和一定的局限性，其中有些高能电池还需要复杂的电池管理系统和温度控制系统。各种电池对充电技术还有不同的要求，而且化学电池中的活性物质在使用一定的期限后会老化变质，以至于完全丧失充电和放电功能而报废，增加了电动汽车的使用成本。

第三代电池是以燃料电池为主的电池，燃料电池直接将燃料的化学能转变为电能，能量转变效率高，比能量和比功率高，并且燃料电池能量转化过程可以连续进行，反应过程能够有效地控制，是比较理想的燃料电池电动汽车用电池。第三代电池的一些关键技术正在不断地突破，并且在使用上取得了良好效果。

另外，“飞轮”储能器是电能-机械能-电能转换的“电池”，超级电容器是电能-电位能-电能转换的“电池”，这种储能器在理论上具有很大的转换能力，而且在“充电”

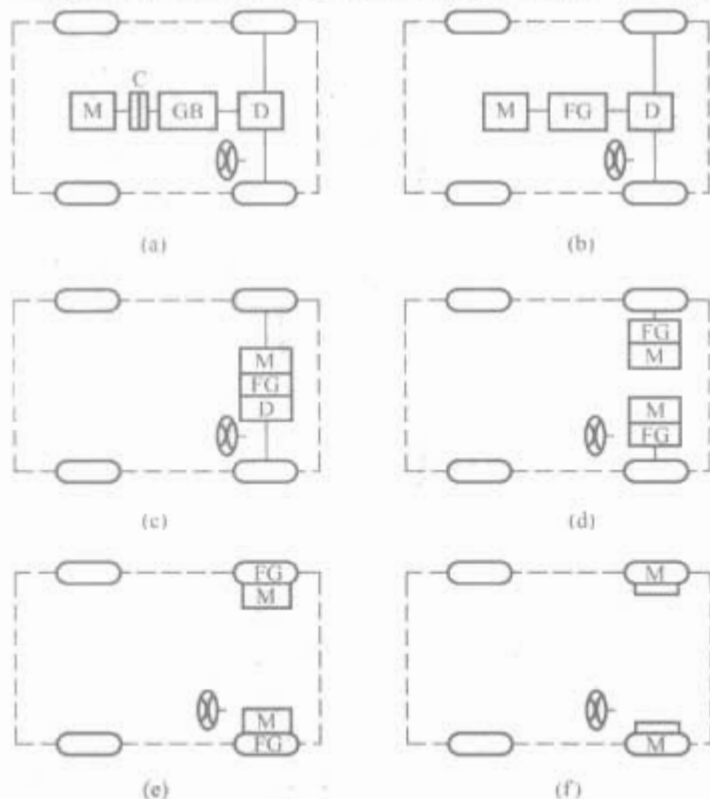


图 1.8-2 电力驱动的结构形式
C—离合器；D—差速器；FG—固定速
比减速器；GB—变速器；M—电动机

和“放电”时十分方便。采用不同类型的储能装置，可构成不同的电动汽车结构，如图 1.8-3 所示。

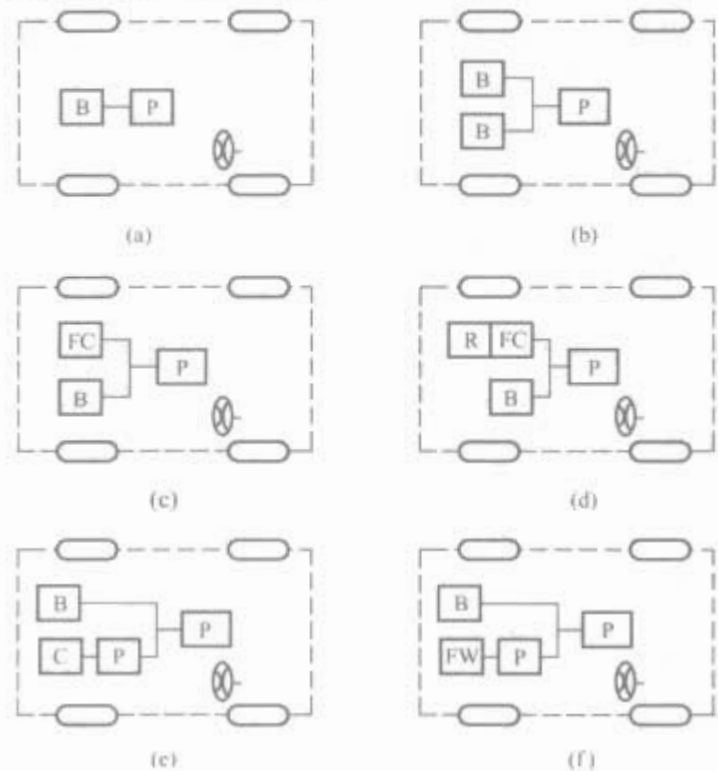


图 1.8-3 储能装置的结构形式

B—蓄电池；C—超级电容；FC—燃料电池；
FW—超高速飞轮；P—功率转换器；R—R 重整器

实际开发的电动汽车往往是由多个 12V 或 24V 的电池串联成的动力电池组作为唯一的动力源，动力电池组是电压为 155~300V 的高压直流电源，在电动汽车上，还有空调系统的空气压缩机，动力转向系统的油泵和制动系统的真空泵等，也需要动力电池提供动力电能。空调系统的空气压缩机如果用动力电池组供给电能，则对电动汽车的动力性能影响很大，可以使电动汽车的续航里程减少近 30%。一般采取智能控制系统，在电动汽车起动、加速、爬坡和停车时，控制空调系统停止运转，以节约电能。

2.1.3.2 电池的管理系统、充电系统

对动力电池的管理包括：对动力电池组的充电与放电时的电流、电压、放电深度、再生制动反馈的电流、电池的自放电率、电池温度等进行控制。个别蓄电池性能变化后，影响到整个动力电池组的性能，用电池管理系统来对整个动力电池组和动力电池组中的每一单体电池进行监控，保持各个电池间的一致性，还应建立动力电池组的维护系统，来保证电动汽车正常运行。

动力电池组必须进行周期性的充电，对充电时的电压和电流都有一定的要求。因此，高效率的充电装置和快速充电装置也是电动汽车所必须的设备。电动汽车根据不同的形式，采用地面充电器、车载充电器、接触式充电器或感应充电器等进行充电。

电池充电系统、管理体系、维修系统和再生制动能量的回收等是一个全新的系统工程，是电动汽车运行的保证体系，其重要性不亚于电动汽车本身。建立充电站系统，使电动汽车的充电能够像内燃机汽车加油站那样便利、普及；应建设报废蓄电池的回收和处理工厂，以避免出现废料造成严重污染，也都是推广电动汽车的关键问题，需要得到政府和社会的重视和支持。

2.1.4 辅助子系统

在传统的内燃机汽车上，制动系统、照明系统、信号系统、刮水器、喷淋器、电动车门、电动车窗、音响、电视、多媒体、安全气囊、防撞系统、导航系统、车载电话等都采

用了 12V 或 24V 的低压电源，并且装备了发电机—电压调节器—蓄电池的低压电源系统。因此，电动汽车的动力电池组还要通过 DC/DC 转换器供应 12V 或 24V 的低压电，并储存到低压辅助电池组中，作为电动汽车的仪表、照明和信号等工作的电源。DC/DC 转换器和低压辅助电池组承担从动力电池组向低压电池组充电，然后由低压电池组向各个用电装置提供电能的工作，全部过程都是在中央控制器的监控和指令下进行的。

2.1.4.1 控制技术

对汽车驾驶员来说，加速踏板、制动踏板等操纵装置是十分熟悉和习惯使用的操纵装置。为了保持传统的驾驶习惯，电动汽车保存了加速踏板、制动踏板和各种控制手柄等，在电动汽车上是将加速踏板、制动踏板机械位移的行程量转换为电信号，输入中央控制器，通过动力控制模块控制、驱动电动机运转。

电动汽车的控制系统主要是对动力电池组的管理和对电动机的控制，车辆行驶工况的变化而引起的电动机输出功率、转矩和转速的变化，必然引起动力电池组的电压、电流等的改变。通常采用电压表、电流表、电功率表、转速表和温度表等仪表来显示各种参数，特别是对动力电池组剩余电量和剩余续航里程的显示有重要意义。有些电动汽车的仪表板上采用红色和蓝色箭头来表示电流的流向，同时用数字表示输出或输入的功率的大小，能够一目了然地观察到整个动力电池组和驱动电动机的运转的情况。

由于电动汽车高度电气化，因此更加有条件实现机电一体化，采用自动化的控制系统和管理系统，一般用中央控制器中的计算机来进行控制和管理。另外，控制系统还包括整车低压系统的电子、电器装置、现代化卫星导航和雷达防撞等装备的控制，现代控制理论在电动汽车上得到广泛的应用。电动汽车除装备现代内燃机汽车的一些先进的电子设备外，电动轮、四轮转向、再生制动和太阳能的利用等都可以在电动汽车上发挥其独特的作用。

在电动汽车控制系统中应用了各种各样的传感器、电流检测器、测速编码器、显示装置、仪表、报警装置和自诊断装置等，对整个动力电池组—电流转换器—驱动电动机系统进行监控并及时反馈信息和报警。

2.1.4.2 安全保护系统

电动汽车的动力电池组具有 96~312V 高压直流电，人身触电时会造成致命的危险。因此，必须设置安全保护系统，确保驾驶员、乘员和维修人员在驾驶、乘坐和维修时的安全。另外，当摔车、翻车或线路发生短路时，驾驶员能够迅速切断动力电池组的电源，避免发生火灾，保护乘员的安全，同时还需要注意防止电池中的电解液溢出时对乘员造成的伤害。电动汽车必须配备电气装置的故障自检系统和故障报警系统，在电气系统发生故障时自动控制电动汽车不能起动等，及时防止事故的发生。

2.1.5 电动汽车的控制策略和控制系统

电动汽车的控制策略和控制系统主要起以下作用：

- (1) 在操纵装置和操纵方法上继承或沿用内燃机汽车主要的操纵装置和操纵方法，适应驾驶员的操作习惯，使操作简单化和规范化。
- (2) 在电动汽车控制系统中，采用全自动或半自动的机电一体化控制系统，达到安全、可靠节能、环保和灵活的目的。
- (3) 提高电池的比能量和比功率，实现电池的高能化。
- (4) 采用高效率的电流转换系统和高效率的驱动电动

机，提高电动机和驱动系统的效率。

(5) 采用流线型车身，降低电动汽车的迎风面积和空气阻力系数。采用轻金属材料、高强度复合材料和新型电动汽车专用的车身与底盘结构，实现车身和底盘的轻量化。减轻电动汽车的整备质量。采用低滚动阻力的轮胎，降低电动汽车行驶阻力。

(6) 回收再生制动能量，延长电动汽车的行驶里程，提高电动汽车的节能效率，降低空调系统的能量消耗。图 1.8-4 所示为电动汽车的控制策略和控制系统。

2.2 行驶性能

电动汽车与内燃机车在外表上没有什么区别。它们都采用橡胶轮胎，车轮与地面之间相互接触和相互作用，它们之间的力学过程也不存在本质的区别。这两种汽车的转向装置、悬架装置及制动系统基本上也是相同的。它们之间的主要差别是采用了不同的动力源。内燃机汽车是燃油混合气体在内燃机中燃烧做功，从而推动汽车前进。电动汽车是由蓄电池提供电能，经过驱动系统和电动机，驱动电动汽车行驶。因此，电动汽车的操纵稳定性、平顺性及通过性与内

燃机汽车完全相同。电动汽车本身除具有再生制动性能外，与内燃机的制动性能也是相同的。对于电动汽车不存在燃油经济性，电动汽车的能量供给和消耗，与蓄电池的性能密切相关，直接影响电动汽车的动力性和续驶里程，同时影响电动汽车行驶的成本效益，这是研究电动汽车经济性的课题，这些问题正在研究当中。因此，这两种汽车的动力性既有相同之处，又有区别。

2.2.1 驱动力与行驶阻力

电动汽车在行驶中，由蓄电池输出电能给电动机，电动机输出功率，用于克服电动汽车本身的机械装置的内阻力，以及由行驶条件决定的外阻力消耗的功率。内阻力通常由汽车内机械装置的效率表示，外阻力即电动汽车行驶阻力。从分析电动汽车行驶时的受力状况出发，建立行驶方程式，这是分析电动汽车行驶性能的基础。

2.2.1.1 驱动力

电动汽车的电动机输出轴输出转矩 T ，经过减速齿轮传动，传到驱动轴上的转矩 T_1 ，使驱动轮与地面之间产生相互作用。车轮与地面作用一个圆周力 F_0 ，同时，地面对驱动轮产生反作用力 F_1 。 F_1 与 F_0 大小相等，方向相反， F_1

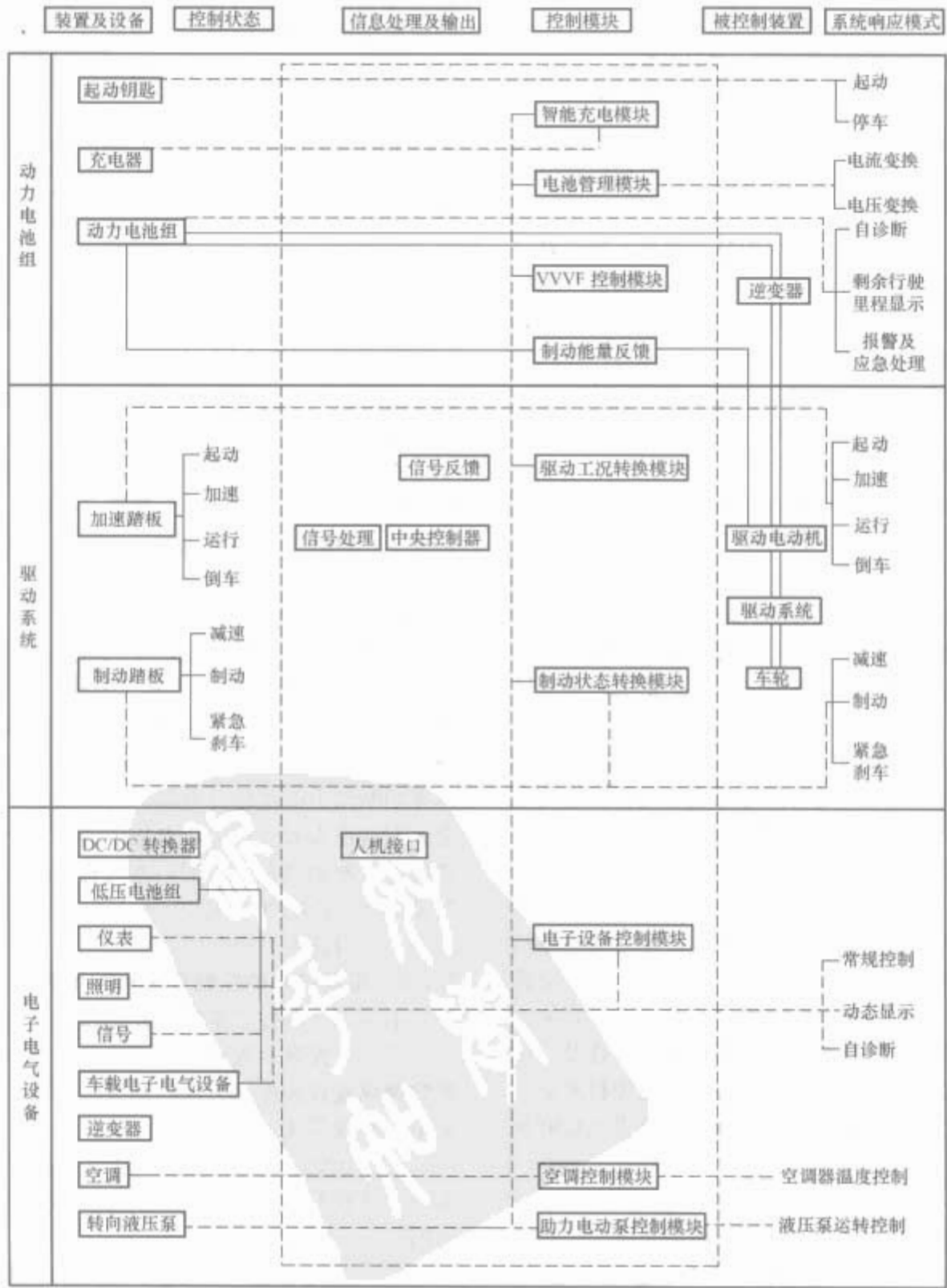


图 1.8-4 电动汽车的控制策略和控制系统

方向与驱动轮前进方向一致，是推动汽车前进的外力，定义为电动汽车的驱动力。有

$$T_t = T_i i_0 \eta \tag{1.8-1}$$

$$F_t = \frac{T_t}{r} = \frac{T_i i_0 \eta}{r} \tag{1.8-2}$$

式中： T_t 为传到驱动轴上的转矩， $N \cdot m$ ； T 为电动机输出转矩， $N \cdot m$ ； i_0 为主减速器传动比； η 为电动汽车机械传动效率； F_t 为驱动力， N ； i_g 为减速器或者变速箱传动比； r 为驱动轮半径， m 。

电动汽车机械传动装置指与电动机输出轴有运动学联系的减速齿轮传动箱或者变速箱、传动轴及主减速器等机械装置。机械传动链中的功率损失有齿轮啮合点处的摩擦损失、轴承中的摩擦损失、旋转零件与密封装置之间的摩擦损失及搅动润滑油的损失等，影响因素复杂，单独计算每个损失都比较困难。现代机械传动装置生产技术水平比较高，传动装置中的损失较小，为了简化计算，将各项损失合并到啮合损失内。对于一般机械传动装置效率，可以按式（1.8-3）计算

$$\eta = \eta_y^n \eta_z^m \tag{1.8-3}$$

式中： η_y 为圆柱齿轮对的效率， $\eta_y = 0.97 \sim 0.98$ ； η_z 为圆锥齿轮对的效率， $\eta_z = 0.96 \sim 0.97$ ； n 为传递转矩时处于啮合状态的圆柱齿轮对数； m 为传递转矩时处于啮合状态的圆锥齿轮对数。

对于采用行星轮系或行星排的机械传动效率，计算方法更为复杂，在此不予讨论。对于单排行星减速器的效率值，一般取 $0.97 \sim 0.98$ 。万向传动轴的效率取 0.98 。

2.2.1.2 电动机转矩特性

汽车在各种行驶工况下行驶时，所需的转矩和功率是行驶速度的函数，取决于不同车速行驶时所遇到的行驶阻力。原动机的转矩—转速特性必须满足汽车的这种需要。假设原动机在不同转速时的功率保持不变，则

$$P_M = \frac{Tn}{9549} \tag{1.8-4}$$

式中： P_M 为原动机的输出功率， kW ； T 为原动机转矩， $N \cdot m$ ； n 为原动机转速， r/min ；

在原动机的工作转速范围内，转矩与转速成反比。转矩特性是一条在第一象限内的双曲线。转速低时，转矩大；转速高时，转矩小。这种特性比较接近汽车的行驶工况。但是各种原动机的转矩特性与这种理想的特性是有区别的。串激式直流电动机的功率与转矩特性如图 1.8-5 所示，串激式交流电动机的功率与转矩特性如图 1.8-6 所示。

图 1.8-5 和图 1.8-6 上分别有三条曲线，即连续功率、

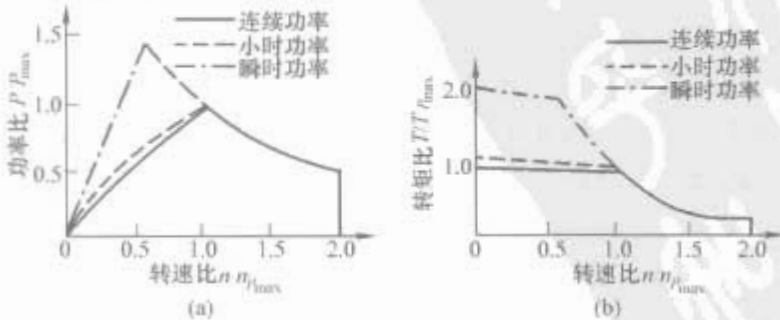


图 1.8-5 加载时间不同时，串激式直流电动机的功率与转矩特性
(a) 串激式直流电动机的功率特性；
(b) 串激式直流电动机的转矩特性

小时功率和起动功率（瞬时功率）。起动功率和小时功率均大于连续功率。由于电动机发热，所以起动功率与小时功率使用时间受到限制。这个特点，使得车辆在短时间内得到较大的加速度，或者说有克服较大坡道阻力的能力，因而得到广泛的使用。

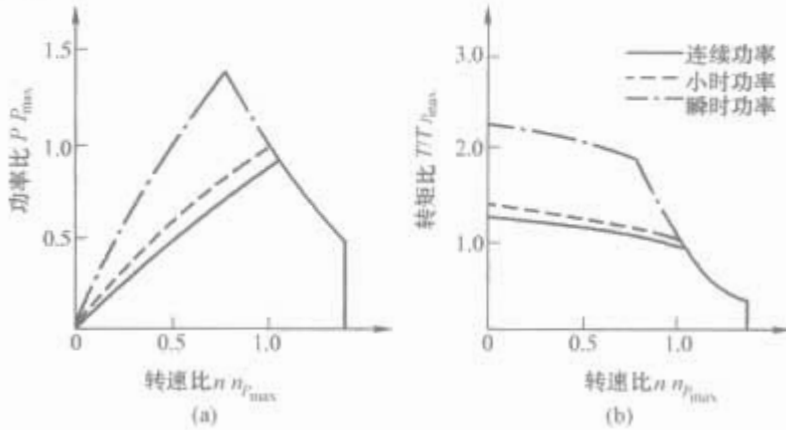


图 1.8-6 加载时间不同时，串激式交流电动机的功率与转矩特性

1994 年，美国通用公司下属的休斯公司向重庆电机厂订购电动汽车用 $50kW$ 交流感应电动机时，提出电动机必须满足的转矩特性如图 1.8-7 所示。

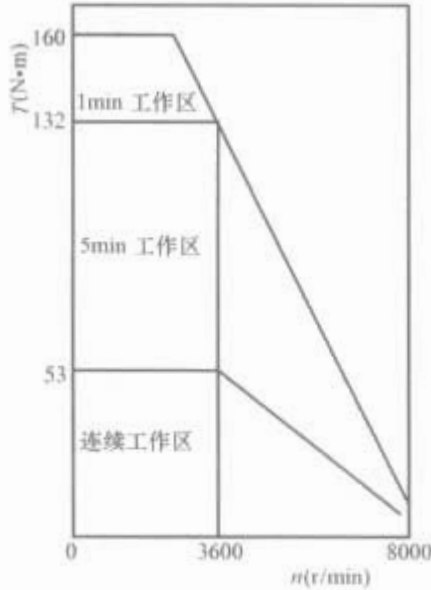


图 1.8-7 重庆电机厂 $50kW$ 交流感应电动机转矩特性

2.2.1.3 行驶阻力

电动汽车在坡道上上坡加速行驶时，作用于电动汽车上的阻力与驱动力保持平衡，建立汽车行驶方程式

$$F_t = F_l + F_w + F_i + F_j \tag{1.8-5}$$

式中： F_t 为电动汽车驱动力， N ； F_l 为电动汽车行驶时的滚动阻力， N ； F_w 为电动汽车行驶时的空气阻力， N ； F_j 为电动汽车行驶时的加速阻力， N ； F_i 为电动汽车行驶时的坡道阻力， N 。

(1) 滚动阻力 F_l 。电动汽车在硬路面所上行驶，由于橡胶轮胎的弹性迟滞形成的能量损失，相当于汽车车轮在前进方向上遇到的一个阻力消耗了汽车的能量，将这个阻力定义为汽车行驶的滚动阻力 F_l ，通常它与车轮上的法向载荷成正比，即

$$F_l = fG \cos \alpha \tag{1.8-6}$$

式中： G 为汽车的总重力， N ； α 为汽车在坡道上行驶时道路的坡度角， $(^\circ)$ ； f 为滚动阻力系数。

滚动阻力系数 f 数值由试验确定。影响滚动阻力系数的因素很复杂，通常滚动阻力系数与路面的种类，行驶车速和轮胎的材料、构造、气压等因素有关。为了降低滚动阻力系数，可以采用低弹性迟滞橡胶、薄胎面、高压子午

线轮胎，如美国通用汽车公司生产的“冲击”电动轿车的车轮，其滚动阻力系数降到 0.004 8，达到了目前最高的技术水平。

在进行汽车动力性分析时，在良好的硬路面上，当 $v < 50\text{km/h}$ 时，滚动阻力系数值 $f = 0.016\ 5$ ， $v > 50\text{km/h}$ 时，可按式 (1.8-7) 进行计算

$$f = 0.016\ 5[1 + 0.01(v - 50)] \tag{1.8-7}$$

根据试验，在良好的水平硬路面上， f 取 0.01~0.012。

(2) 空气阻力 F_w 。根据空气动力学原理，汽车在行驶过程中，由于空气动力的作用，在汽车行驶方向上，作用在汽车上的分力称为空气阻力。空气阻力通常与气流相对速度的动压力成正比。空气阻力可以表示为

$$F_w = \frac{C_D A v_a^2}{21.15} \tag{1.8-8}$$

式中： C_D 为空气阻力系数； v_a 为汽车行驶速度， km/h ； A 为迎风面积，汽车行驶方向上的投影面积， m^2 。

降低空气阻力的主要途径是降低 C_D 值。空气阻力系数 C_D 值与汽车表面的结构形状有关，由风洞试验确定。通常轿车 $C_D = 0.3 \sim 0.46$ ，货车 $C_D = 0.6 \sim 0.7$ ，大客车 $C_D = 0.6 \sim 0.7$ 。近年来，在降低汽车空气阻力系数方面的研究取得很大的进展，如美国通用公司“冲击”牌电动轿车的空气阻力系数 $C_D = 0.19$ 。

迎风面积 A 由式 (1.8-9) 估算

$$A = BH \tag{1.8-9}$$

式中： B 为汽车前轴轮距， m ； H 为汽车的最大高度， m 。

(3) 上坡阻力 F_i 。汽车上坡行驶时，除必须克服滚动阻力与空气阻力外，还必须克服上坡阻力 F_i 。由于汽车的重力沿上坡路面的分力 $G\sin\alpha$ 阻止汽车前进，此力成为上坡阻力 F_i ，有

$$F_i = G\sin\alpha \tag{1.8-10}$$

式中： G 为汽车的总重力， N ； α 为道路的坡度角， $(^\circ)$ 。

道路的坡度角除以角度表示外，在道路工程上常以坡度表示，将坡度角的正切定义为坡度，即

$$i = \tan\alpha = h/s \tag{1.8-11}$$

一般的路面上坡度角很小，可以近似地认为

$$F_i = G\sin\alpha = Gi \tag{1.8-12}$$

(4) 加速阻力 F_j 。设有两个物体，其质量均等于 m ，其中一个物体在运动时有一部分质量可以旋转，并与该物体有一定的运动学联系；另一个物体没有旋转质量。当以相同的力作用于该物体时，两个物体所得到的加速度是不相等的，前者的加速度小于后者。这是因为物体受力作用而作加速运动时，有旋转质量的那一部分除随该物体作平移加速度外，还将产生旋转加速度。因此，旋转质量加速旋转而形成附加惯性负荷表现为对该物体整体的阻力。对于有旋转质量的物体，其加速度比没有旋转质量的物体的加速度要小一些。可以设想有旋转质量的物体，其质量比无旋转质量的物体增加了 δ 倍。 δ 称为质量增加系数，或者质量换算系数，用牛顿第二定律表示为

$$F = \delta ma \tag{1.8-13}$$

电动汽车作加速行驶的加速阻力，相同的原理可以表示为

$$F_j = \frac{\delta G}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \tag{1.8-14}$$

式中： δ 为电动汽车的质量换算系数。

电动汽车的质量换算系数可进一步作理论分析计算，通常由试验确定。对于电动汽车，还缺乏实验数据和近似的计算方法，可参考内燃机汽车的质量换算系数的计算方法。由于电动汽车没有笨重的内燃机和飞轮，电动汽车的质量换算系数会相对小一些。

2.2.2 电动汽车行驶的驱动力与行驶阻力平衡

通常，对汽车的动力性的评价指标有三种，即汽车的最高车速、最大加速能力和最大爬坡度。汽车的最高车速是指汽车在无风的条件下，在水平良好硬路面上所能到达的最高车速。汽车的加速能力用汽车原地起步的加速能力和超车加速能力来表示。通常采用汽车加速过程中所经过的加速时间和加速距离作为评价汽车加速性的指标。汽车的爬坡能力是指汽车在良好道路上以最低行驶车速上坡行驶的最大坡度。

在行驶过程中，汽车的驱动力与行驶阻力始终保持平衡，这种平衡关系由汽车行驶方程式 (1.8-5) 表示。利用行驶方程式，通过解析法或者图解法分析汽车的动力性能。

绘制给定汽车的驱动力和行驶阻力平衡图时，已知数据如下：电动机输出轴上的转矩特性、汽车的总质量、减速器与主减速器的传动比、传动效率、车轮半径、汽车空气阻力系数、汽车的迎风面积。利用式 (1.8-2) 即可计算出汽车车轮上的驱动力。当分析汽车在硬路面上的动力性能时，汽车的车速可由式 (1.8-15) 利用电动机的转速换算

$$v_n = 0.377 \frac{nr}{i_g i_0} \tag{1.8-15}$$

利用上述计算结果，即可画出驱动力图。再将不同车速下的滚动阻力和空气阻力加起来画在驱动力图上，如图 1.8-8 所示。

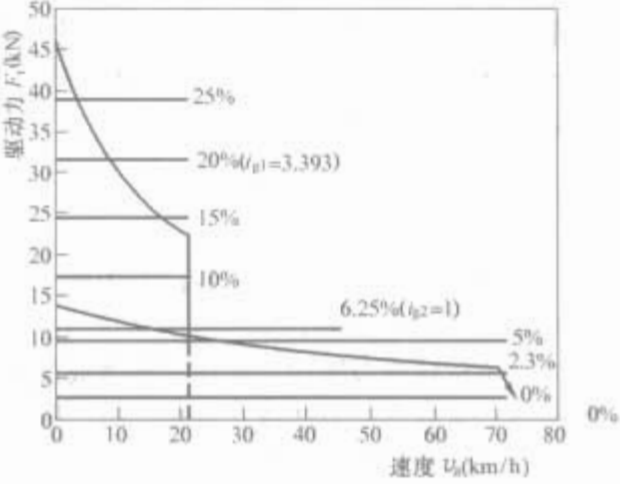


图 1.8-8 驱动力—行驶阻力图

当汽车等速行驶时，由式 (1.8-5) 得

$$F_t = F_i + F_w \tag{1.8-16}$$

由驱动力曲线与 $F_i + F_w$ 曲线的交点求出电动汽车的最高车速。特别要注意这个交点是在电动机的连续工作区，还是在短时工作区或者瞬间工作区，电动汽车的最高车速只有在电动机的连续工作区才有意义。

令 $F_{fw} = F_i + F_w$

将式 (1.8-5) 改写为

$$F_t + F_j = F_{fw} \tag{1.8-17}$$

汽车在坡道上以速度 v 等速行驶， $F_j = 0$ ，则

$$i = \frac{F_t - F_{fw}}{G} \tag{1.8-18}$$

由式(1.8-18)求出电动汽车以速度 v 等速爬坡行驶的坡度 i 。当车速 $v=v_{\min}$ 时,即可求得电动汽车的最大爬坡度 i_{\max} 。注意此处 F_t 应该取短时间工作的转矩曲线对应的 F_t ,如图 1.8-9 所示。图 1.8-9 表示五种不同主减速比时的电动汽车爬坡坡度曲线。

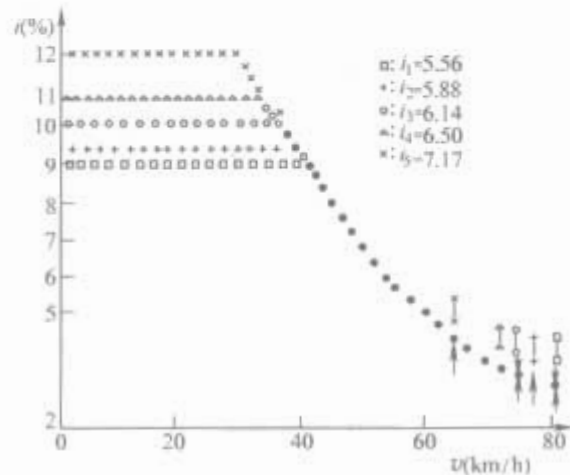


图 1.8-9 五种不同减速比时的电动汽车爬坡速度
当汽车在水平良好硬路面上加速行驶时, $F_i=0$, 则得

$$\left. \begin{aligned} F_t &= F_t - F_{fw} \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{g}{\delta G} (F_t - F_{fw}) \end{aligned} \right\} \quad (1.8-19)$$

利用式(1.8-19),再经过一些数学处理后,可由计算机编程计算汽车的加速性能。图 1.8-10 表示的是五种不同主减速器传动比的加速曲线。

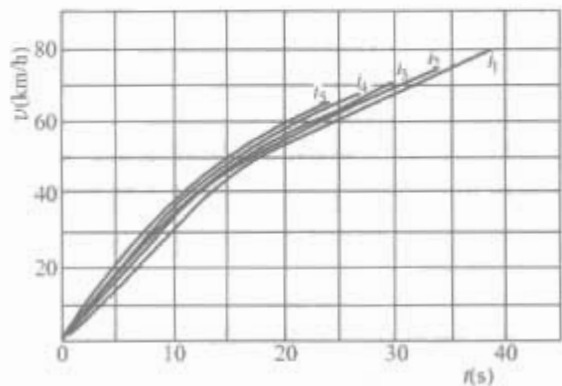


图 1.8-10 五种不同主减速器传动比的电动汽车加速曲线

2.2.3 功率平衡

2.2.3.1 电动机输出功率与阻力功率

由汽车行驶方程式(1.8-5)可知

$$F_t = F_t + F_w + F_i + F_j \quad (1.8-20)$$

以电动汽车行驶速度 v_a 乘以式(1.8-20)两端,考虑机械损失,再经过单位换算之后可得

$$P_M = \frac{1}{\eta} \left(\frac{Gf \cos \alpha v_a}{3600} + \frac{G \sin \alpha v_a}{3600} + \frac{C_D A v_a^3}{76140} + \frac{\delta G v_a}{3600g} \cdot \frac{dv}{dt} \right) \quad (1.8-21)$$

或
$$P_M = \frac{1}{\eta} (P_t + P_w + P_i + P_j) \quad (1.8-22)$$

式中: P_M 为电动机输出功率, kW; G 为车重力, N; v_a 为车速, km/h; η 为电动汽车电动机输出轴至驱动轮之机械传动装置的总效率; $\frac{dv}{dt}$ 为电动汽车的行驶加速度, m/s^2 。

电动机的输出功率换算到驱动轮上的输出功率,应该考虑传递过程中的机械损失,即

$$P_t = \eta P_M \quad (1.8-23)$$

克服电动汽车行驶滚动阻力所消耗的功率为

$$P_t = \frac{Gf \cos \alpha v_a}{3600} = \frac{Gf v_a}{3600} \quad (1.8-24)$$

克服空气阻力所消耗的功率为

$$P_w = \frac{C_D A v_a^3}{76140} \quad (1.8-25)$$

克服坡度阻力所消耗的功率为

$$P_i = \frac{G \sin \alpha v_a}{3600} = \frac{G i v_a}{3600} \quad (1.8-26)$$

克服空气阻力所消耗的功率为

$$P_j = \frac{\delta G v_a}{3600g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1.8-27)$$

2.2.3.2 电动汽车的功率平衡

电动汽车在行驶时,电动机传递到驱动轮的输出功率与体现在驱动轮上的阻力功率始终保持平衡,有

$$\begin{aligned} P_M &= \frac{1}{\eta} (P_t + P_w + P_i + P_j) \\ P_t + P_j &= \eta \left[P_M - \frac{1}{\eta} (P_t + P_w) \right] \end{aligned} \quad (1.8-28)$$

用曲线图表示上述功率关系,将电动机的输出功率、汽车经常遇到的阻力功率 $\frac{1}{\eta} (P_t + P_w)$ 对车速的关系归置在 $x-y$ 坐标图上,得到电动汽车功率平衡图如图 1.8-11 所示。

从图 1.8-11 可以看出,由阻力功率 $\frac{1}{\eta} (P_t + P_w)$ 与连续工作的电动机输出功率曲线的交点求出电动汽车的最高车速为 v_{\max} 。在良好的平路上加速行驶的坡度 $i=0$,由式(1.8-21)和式(1.8-23)得

$$P_t = \eta \left[P_M - \frac{1}{\eta} (P_t + P_w) \right]$$

车速为 v_a 时的加速度为

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3600g\eta}{\delta G v_a} \left[P_M - \frac{1}{\eta} (P_t + P_w) \right] \quad (1.8-29)$$

汽车等速上坡行驶时,加速度 $dv/dt=0$, 则

$$P_t = \eta \left[P_M - \frac{1}{\eta} (P_t + P_w) \right]$$

车速为 v_0 时的爬坡度为

$$i = \frac{3600\eta}{G v_0} \left[P_M - \frac{1}{\eta} (P_t + P_w) \right] \quad (1.8-30)$$

应当指出,利用功率平衡图求最高车速时, P_t 应取连续功率曲线上的点求取加速度;求最大爬坡度时, P_t 可以取持续 1~5min 工作的功率曲线之上点。

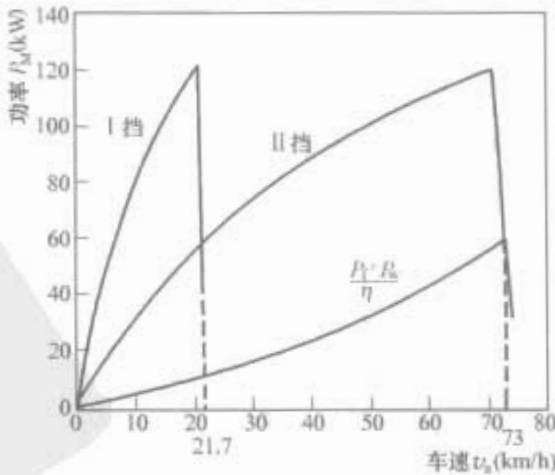


图 1.8-11 电动汽车功率平衡图

2.2.4 电动汽车主电路的负载电流

电动汽车在行驶过程中所需的阻力功率随时都在变化,电动机的输出功率也将随阻力功率的变化而变化。电动汽车

主电路中传递的电功率也是在不断变化的,但与所需的阻力功率始终保持平衡。通常,电动汽车在运行过程中,主电路中的电流变化较大,主电路电流的大小不仅影响系统的散热和正常工作,而且还直接影响蓄电池放电性能和使用寿命,同时影响一次充电后的续驶里程。这些是当前电动汽车技术正在研究解决的重要课题。为了简化起见,下述分析中总是假定蓄电池的端电压及逆变器的输出电压保持不变,因此,本节只能做些粗浅的分析。

2.2.4.1 主电路传递的功率

电动汽车上的电路较为复杂,有供照明与仪表的电路,提供取暖、通风、散热和制冷的电路,给制动装置与转向装置提供动力的电路,还有其他电子设备的电路等,这里不进行深入分析。当采用交流感应电动机时,电动汽车的主电路是指给电动汽车行驶提供所需能量的电路,即动力蓄电池组到控制器和逆变器之间的直流电路,以及逆变器与交流感应电动机之间的交流电路,将这两条电路称为电动汽车主电路,如图 1.8-12 所示。

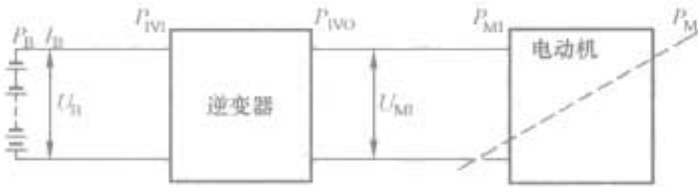


图 1.8-12 电动汽车的主电路

由图 1.8-11 可知

$$P_B = P_{IVI} \tag{1.8-31}$$

式中: P_B 为动力蓄电池组的输出功率, W; P_{IVI} 为逆变器的输入功率, W。

$$P_B = U_B I_B \tag{1.8-32}$$

式中: U_B 为动力蓄电池串联时的端电压, V; I_B 为动力蓄电池串联时的输出电路的电流, A。

由于蓄电池存在内阻,接通电路后,端电压将有所下降,此处忽略不计。假设逆变器的效率为 η_{IV} , 电动机的效率为 η_M , 则

$$\begin{aligned} P_{IVO} &= \eta_{IV} P_{IVI} \\ P_{IVO} &= P_{MI} \\ P_{IVO} &= \eta_{IV} P_B \end{aligned} \tag{1.8-33}$$

式中: P_{IVO} 为逆变器的输出功率, W; P_{MI} 为电动机的输入功率, W。

对于三相交流感应电动机,有

$$P_{MI} = \sqrt{3} U_{MI} I_{MI} \cos \varphi \tag{1.8-34}$$

式中: U_{MI} 为逆变器输出端的线电压, V; I_{MI} 为逆变器输出端的线电流, A; $\cos \varphi$ 为交流感应电动机的功率因数。

另外

$$\begin{aligned} P_{MI} &= \eta_{IV} P_B \\ P_M &= \eta_M P_{MI} \end{aligned} \tag{1.8-35}$$

2.2.4.2 主电路的负载电流

电动汽车在行驶过程中各种工况下消耗的功率是不同的,主电路的复杂电流也不一样。电动汽车等速行驶所需的功率换算至电动机输出轴为

$$\begin{aligned} P_{fw} &= \frac{1}{\eta} \left(\frac{GfV}{3600} + \frac{G_D A V^3}{76140} \right) \\ P_M &= 1000 P_{fw} \end{aligned} \tag{1.8-36}$$

假定电动汽车主电路的电压保持不变,由式 (1.8-33) 和式 (1.8-35) 即可计算电动汽车等速行驶工况的主电路中负载电流。电动汽车主电路中的直流电路的负载电流为

$$I_{CD} = \frac{P_B}{U_B} = \frac{1000 P_{fw}}{\eta_M \eta_{IV} U_B} \tag{1.8-37}$$

电动汽车主电路中的交流电路的负载电流为

$$I_{AC} = \frac{P_{MI}}{\sqrt{3} U_{MI} \cos \varphi} = \frac{P_M}{\sqrt{3} U_{MI} \eta_M \cos \varphi} \tag{1.8-38}$$

当电动汽车在良好的平路上加速行驶时,电动汽车消耗的功率由加速开始瞬间的行车速度 v_0 计算等速消耗的功率 $P_{fw} = P_f + P_w$, 加上加速过程所需的功率 P_j , 则

$$P_M = 1000 (P_j + P_{fw})$$

同理,电动汽车在坡道上等速行驶时所需的功率为

$$P_M = 1000 (P_i + P_{fw})$$

采用类似的算法可以计算电动汽车在加速时的主电路的负载电流或在坡道上等速爬坡时主电路的负载电流。

2.2.5 续驶里程

电动汽车上动力蓄电池组两次充足电之间的总行驶里程称为电动汽车的续驶里程,以千米 (km) 表示。电动汽车的续驶里程短是电动汽车落后于内燃机汽车的重要原因。因此,如何降低不同行驶工况下电动汽车的能量消耗,提高电动汽车的效率,增加续驶里程,是发展电动汽车必需解决的重要课题。国外对此进行了大量的研究工作,但是仍缺少系统、深入的理论分析,本节仅作简要介绍。

2.2.5.1 影响因素

影响电动汽车续驶里程的因素比较复杂。电动汽车的续驶里程与电动汽车在行驶过程中的能量消耗紧密相关,影响它们的主要因素来自电动汽车行驶的外部条件与电动汽车本身的结构条件。

(1) 行驶的环境状况。在相同的车辆条件下,电动汽车行驶的道路与环境气候影响着电动汽车行驶的能量消耗,如气温的高低、风力的方向与大小、道路的种类与交通拥挤状况,都会使车辆的能量消耗增加或减小,从而使电动汽车的续驶里程有显著的区别。

(2) 电动汽车的行驶规范。行驶规范是指预先确定的行驶速度与时间的变化关系图线。电动汽车试验时必须沿着规范给定的速度时间程序行驶,通常称为多工况道路循环试验法,也可以采用给定的单一恒速工况进行试验对比。采用多工况道路循环试验较为接近车辆实际的行驶工况,具有较好的可比性。国外测试电动汽车续驶里程常采用多工况道路循环试验法,如联合国欧洲经济委员会 (ECE) 采用 ECE-R15 城市循环工况法,如图 1.8-13 所示;日本采用 10.15 城市循环工况法,如图 1.8-14 所示;美国电动汽车采用 SAE J227a 试验循环,如图 1.8-15 所示。表 1.8-2 为 SAE J227a 试验循环的四种循环工况。

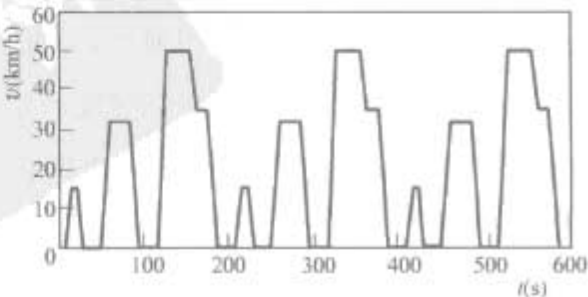


图 1.8-13 ECE-R15 城市循环工况法

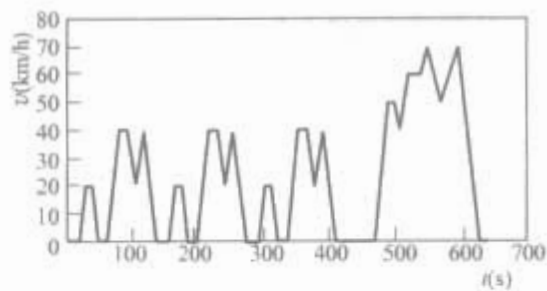


图 1.8-14 日本 10.15 城市循环工况法

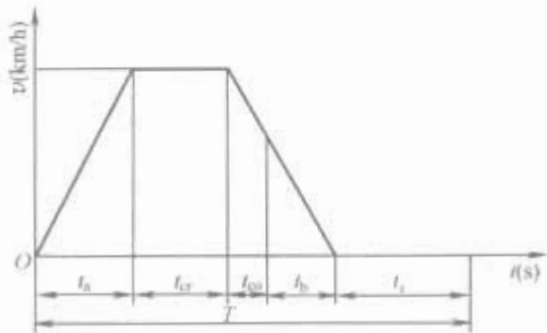


图 1.8-15 SAE J227a 试验循环

表 1.8-2 SAE J227a 试验循环工况

循环模式	A	B	C	D
v (km/h)	16 ± 1.5	32 ± 1.5	48 ± 1.5	72 ± 1.5
t_a (加速段, s)	4 ± 1	19 ± 1	18 ± 1	28 ± 2
t_{cr} (等速段, s)	0	19 ± 1	20 ± 1	50 ± 2
t_{em} (滑行段, s)	2 ± 1	4 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
t_b (制动段, s)	3 ± 1	5 ± 1	9 ± 1	9 ± 1
t_i (零速段, s)	30 ± 2	25 ± 2	25 ± 2	25 ± 2
T (循环总时间, s)	39 ± 2	72 ± 2	80 ± 2	122 ± 2

(3) 滚动阻力与空气阻力。滚动阻力与空气阻力消耗的能量是电动汽车能量消耗的主要组成部分。如何降低滚动阻力系数与空气阻力系数，仍有许多课题需要研究解决。美国通用汽车公司 (GM) 的 “Impact” 与日本东京电力股份有限公司 IZA (伊扎) 电动汽车在这方面达到了当前最高技术水平。

(4) 蓄电池的性能。蓄电池的性能参数主要是蓄电池的能量密度、额定容量、放电率、放电电流、放电深度、蓄电池内阻，特别是蓄电池整组的一致性 & 电池的环境温度等是影响电动汽车行驶的能量消耗和续驶里程的重要因素。在北京，一辆电动自行车在冬天的续驶里程只有在夏天时的一半左右。蓄电池性能对续驶里程的影响实际要复杂得多，请参阅对此课题更详尽的论述文献。

(5) 电动汽车的总质量。电动汽车在行驶过程中所消耗的功率，除了空气阻力功率之外，都是与电动汽车的总质量呈正比。电动汽车的总质量越大，消耗的功率和能量越高，它们之间呈线形比例关系。因而，电动汽车的续驶里程随其总质量的增加而减少。增加电动汽车上的电池数量，一方面可以增加电动汽车的总能量储备和续驶里程，另一方面也将大大增加电动汽车的总质量，又会增大电动汽车的能量消耗，降低电动汽车的续驶里程。

(6) 辅助装置的能量消耗。汽车上制动系统的空气压缩机，转向系的油泵均需要辅助电动机驱动，其他还有照明、音响、通风、取暖、空调，都需要消耗蓄电池的电能。除空调外，这部分能量消耗约占电动汽车总能耗的 6%~12%。空调采用涡旋式压缩机，在制冷量相同的条件下，比往复式压缩机的能耗要低一半。应该在一个合理的时间内降低车内

的空气温度到一个可接受的水平，尽量减少空调的能量消耗。

2.2.5.2 续驶里程

如上所述，不同的电动汽车在不同的行驶工况下单位行驶里程的能量消耗与续驶里程有显著的差别，难于用统一的计算公式进行计算。可用试验方法求取。采用电动汽车在道路上滑行试验的方法可求取汽车的滚动阻力和空气阻力，试验中采用五轮仪记录汽车在滑行过程的 $v-t$ 曲线，如图 1.8-16 所示。

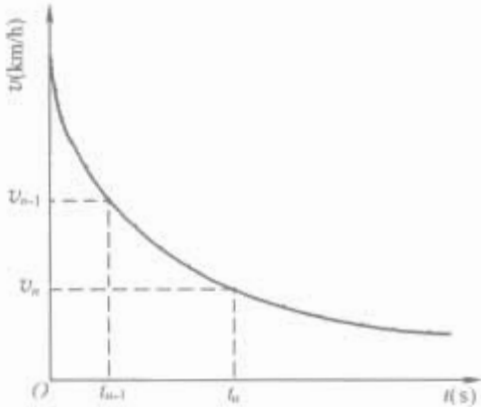


图 1.8-16 电动汽在滑行试验的 $v-t$ 曲线

$$F_f + F_w = \frac{G}{g} \frac{dv}{dt} - \frac{M_m}{r} \tag{1.8-39}$$

M_m 是传动系统加于驱动轮的摩擦阻力矩，可用其他方法求取。或在式 (1.8-40) 中忽略 M_m 项，对计算结果再进行修正。在式 (1.8-39) 两端乘以平均速度，克服道路滚动阻力和空气阻力消耗的功率为

$$P = P_f + P_w$$
$$= \frac{m}{3.6^2 \times 1000} \frac{v_n + v_{n-1}}{2} \frac{v_{n-1} - v_n}{t_n - t_{n-1}} \tag{1.8-40}$$

经过单位换算后，化简得

$$P = 3.86 \times 10^{-5} M \cdot \frac{v_n^2 - v_{n-1}^2}{t_n - t_{n-1}} \tag{1.8-41}$$

式中： m 为电动汽车质量，kg； v 为电动汽车的速度，km/h； t 为时间，s。

电动汽车克服道路滚动阻力和空气阻力消耗的能量为

$$E = FS \tag{1.8-42}$$

电动汽车行驶单位里程消耗的能量是

$$e = \frac{FS}{S} = \frac{P}{v} \tag{1.8-43}$$

电动汽车滑行时的平均车速为

$$v_{av} = \frac{v_{n-1} - v_n}{t_n - t_{n-1}} \tag{1.8-44}$$

因此，电动汽车在平均车速下克服道路滚动阻力和空气阻力的单位里程消耗的能量为

$$e = \frac{m}{3.6 \times 3600} \left(\frac{v_{n-1} - v_n}{t_n - t_{n-1}} \right) \tag{1.8-45}$$

$$e = 7.72 \times 10^{-5} m \left(\frac{v_{n-1} - v_n}{t_n - t_{n-1}} \right) \tag{1.8-46}$$

经过修正后的电动汽车克服道路阻力所消耗的功率 P 与车速 v 的关系如图 1.8-17 所示，所需能量与车速之间的关系如图 1.8-18 所示。

表 1.8-3 和表 1.8-4 是美国 G 型厢式电动汽车的试验数据，图 1.8-19 是 G 型厢式电动汽车等速行驶时的能量消耗与车速之间的关系。

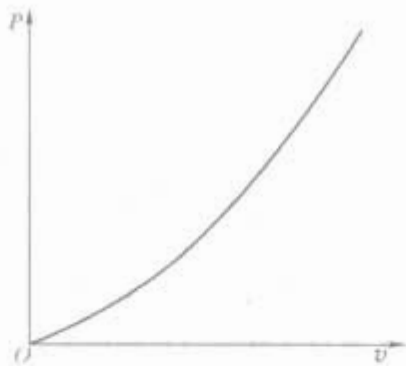


图 1.8-17 电动汽车行驶所需功率与速度关系

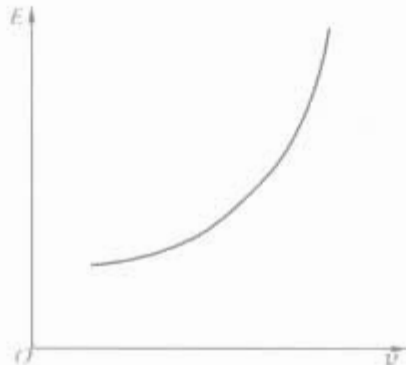


图 1.8-18 电动汽车行驶所需能量与车速关系

表 1.8-3 G 型厢式电动汽车实验结果①

参 数	原车型	改型车	载货车
整备质量 (kg)	3460	3451	3226
试验质量 (kg)	3682	3682	3530②
100%充电时最大车速 (km/h)	86.0	84.5	88.7
20%充电时最大车速 (km/h)	86.3	84.8	89.5
100%充电、5min 工作最大车速 (km/h)	—	84.0	88.4
20%充电、5min 工作最大车速 (km/h)	—	84.0	87.4
从 0 加速至 48km/h 100%充电加速时间 (s)	12.2	12.1	11.9
从 0 加速至 48km/h 20%充电加速时间 (s)	12.4	12.2	12.1
在 18%坡度上，100%充电最大车速 (km/h)	10.9	—	—
在 18%坡度上，20%充电最大车速 (km/h)	10.8	—	—
从 48 km/h 开始制动的制动距离 (mm)	16.7	—	—
56km/h 等速行驶交流能量消耗 (W·h/km)	470	390	416
56km/h 等速行驶直流能量消耗 (W·h/km)	271	232	234
SAEJ227aC 循环交流能量消耗 (W·h/km)	693	650	576
SAEJ227aC 循环直流能量消耗 (W·h/km)③	366	329	335
城市市区行驶交流能量消耗 (W·h/km)	987	952	920
城市市区行驶直流能量消耗 (W·h/km)	518	400④	520

① 试验数据已对温度影响进行过调整，因此，表中数据不受蓄电池温度的影响。
② 载货车的整备质量加一半载重量 3530kg，而不是 3564kg。
③ 数值由放电能量减去再生能量计算结果。
④ 这个错误结果由仪器故障引起。

表 1.8-5 国内外电动汽车的能耗与续驶里程

车 型	总质量 (kg)	总能量 (kW·h)	续驶里程 (km)	能 耗 (kW·h/km)	比能耗 [kW·h/(km·t)]
美国通用公司 Impact	1345	16.2	95	0.145	0.107
G 型厢式电动汽车	3530	33.55	97.6	0.344	0.097
U. S 电动轿车	16420	130	120.7	1.077	0.066
大发 HJ-IET	1395	14.4	100	0.144	0.103
日本东京电力股份有限公司 IZA (伊扎) 电动汽车	1573	28.8	548	0.05260	0.035

表 1.8-4 G 型厢式电动汽车与温度有关的实验结果

参 数	原型车	改型车	载货车
56km/h 等速行驶续驶里程 (km)	130.6	144.6	158.7
SAEJ227aC 循环续驶里程 (km)	84.5	91.1	97.6
城市市区行驶路线续驶里程 (km)	54.3	49.7①	59.1
10%坡度上的持续里程 (km)	—	8.4	—

① 试验过程中由于电动机漏油而过热。

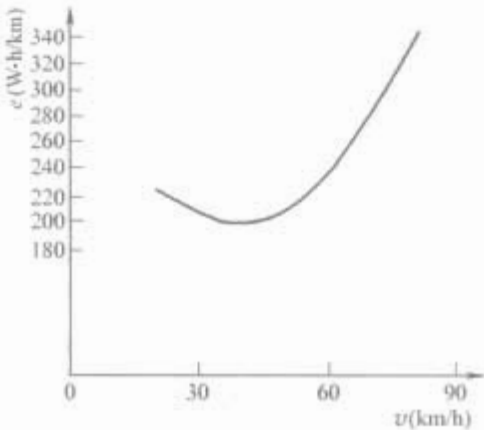


图 1.8-19 G 型箱式电动汽车等速行驶的能耗与车速关系

单位里程的能耗 e (kW·h/km) 在某些文献中称为电动汽车的效率。在另外一些文献中，将电动汽车的能量经济性定义为电动汽车以不同行驶规范达到的续驶里程，与蓄电池再充电恢复到原有的充电状态所需要的交流电能量之比，如式 (1.8-47) 所示

电动汽车经济性=
$$\frac{\text{预定行驶规范所走的续驶里程}}{\text{蓄电池再充电恢复到原充电状态所需的交流电能量}} \quad (\text{AC}) \quad (1.8-47)$$

设电动汽车行驶时单位里程能耗为 e (kW·h/km)，电动汽车总质量为 m ，单位为吨 (t) 时，将电动汽车行驶的比能耗定义为 e_0 ，则

$$e_0 = \frac{e}{m} \quad (1.8-48)$$

$$e = e_0 m \quad (1.8-49)$$

实际情况并没有计算式那样简单，由于空气阻力消耗的能量与质量无关，同时蓄电池存在放电效率、放电深度、放电电流及自放电现象，有的蓄电池每天自放电率高达 1% 以上，都会影响动力电池组的输出总能量。另外，行驶规范的差别等因素都将影响电动汽车的续驶里程，因此，式 (1.8-49) 只能近似地估算电动汽车的续驶里程。

表 1.8-5 为国内外电动汽车比能耗与续驶里程的统计数据。由表中数据可知，电动汽车单位里程的能耗在 0.11~1.07kW·h/km 范围内变化。电动汽车比能耗在 0.035~0.11kW·h/(km·t) 范围内变化。

续表

车 型	总质量 (kg)	总能量 (kW·h)	续航里程 (km)	能 耗 (kW·h/km)	比能耗 [kW·h/(km·t)]
华利微型电动汽车	1420	14.4	90	0.16	0.113
清华号电动汽车	1290	14.4	100	0.144	0.11
华联 HL-42 轿车	1378	17.2	156	0.11	0.08
华联 HL-61 轿车	4560	42.2	156~128	0.27~0.19	0.04~0.06
北京市大通道电车	16000~18000	90 ^①	100	0.9	0.05~0.06
电池国家标准	16000~18000	115 ^①	100	1.15	0.064~0.072
美国加州试验结果				0.132~0.294	
奥地利 150 辆电动汽车试验结果				0.134~0.25	
YW61200DD 电动大客车 (40km/h 等速)	16980	110	165.2	0.665	0.039
BJD6100 电动公交车 (40km/h 等速)	15610	113.03	168	0.672	0.043

① 表中数据为电池百公里能耗。

2.3 特征技术

2.3.1 单电机或多电机驱动

差速器是传统车辆的标准组件，电动汽车也采用了这项技术。当汽车转弯时，外侧车轮的转弯半径比内侧车轮的大，必须利用差速器来调整两侧车轮的转速，否则车轮会产生滑移而引起轮胎磨损加剧、转向困难、道路附着性能变差等。对于传统的燃油汽车，无论是前轮驱动还是后轮驱动，机械式差速器都是必备的。图 1.8-20 显示了典型的机械差速器的结构，差速器的行星齿轮绕各自的轴旋转，从而使两个半轴齿轮能以不同转速旋转。

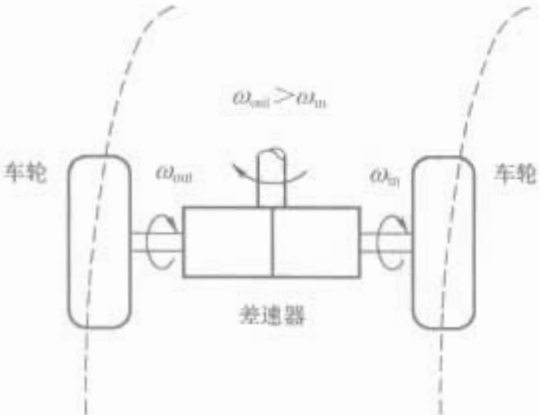


图 1.8-20 机械差速器

对于电动汽车，如果采用双电动机或者四个电动机驱动，由于每个电动机的转速可以有效地独立调节控制，实现电子差速，所以在这种情况下，电动汽车可以不用机械差速器。图 1.8-21 所示的是带电子差速器的双电动机驱动的结构。电子差速器比机械差速器体积小、质量小。人们对是否选用机械差速器不像对是否选择可变速比或固定速比变速箱

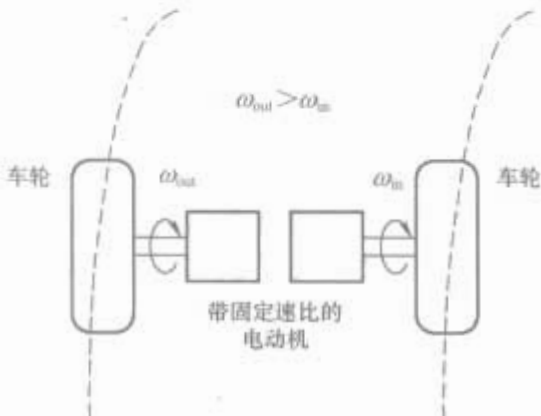


图 1.8-21 带电子差速器的双电动机驱动

的意见那样一致，如果电动汽车采用单电动机驱动，就必须装机械差速器，而多电动机系统就采用电子差速。电子差速器的优点是体积小、质量小，在汽车转弯时可以实现精确的电子控制，提高电动汽车的性能；其缺点是由于增加了电动机和功率转换器，增加了初始成本，而且在不同条件下对两个电动机进行精确控制的可靠性需要进一步发展。近年来，由于电子控制器具有容错能力，其可靠性得到了很大的改善。如由三个微处理器组成的电子控制器，其中两个分别控制左、右两个电动机，另一个用于控制和协调，通过监测器来监视彼此的工作情况，以改善其可靠性。

2.3.2 轮毂电机驱动

如果将驱动电动机直接安装在车轮上，则可以缩短甚至去掉电动机与车轮之间的机械传递装置，这取决于采用高速内转子还是低速外转子电动机。若采用高速内转子电动机，则必须装固定速比的减速器来降低车速。一般采用高减速比的行星齿轮减速装置，将它安装在电动机输出轴和车轮轮缘之间，这种电动机设计的工作转速约为 10000r/min，目的是为了获得更高的功率密度。电动机的最高转速主要受线圈损失、摩擦损失及变速机构的承受能力等因素的限制，所选用的行星齿轮变速机构的速比为 10：1，而车轮的转速范围则降为 0~1000r/min。若采用低速外转子电动机，则可以完全去掉变速装置。由于外转子就安装在车轮轮缘上，而且电动机转速与车轮转速相等，因而不需要减速装置。图 1.8-22 显示了这两种内置轮式电动机的结构，它们采用

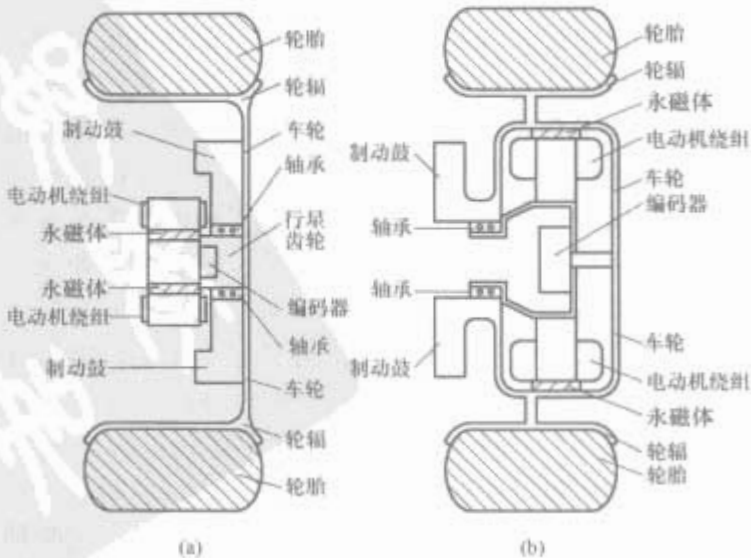


图 1.8-22 两种内置轮式电动机

(a) 内转子电动机；(b) 外转子电动机

的都是永磁无刷电动机,由于其具有显著的高功率密度的特点,因而比其他电动机更吸引人。

高速内转子电动机具有体积小、质量小和成本低的优点,但它需要加行星齿轮变速机构。而低速外转子电动机结构简单,无须齿轮变速传动机构,但它是低速电动机的体积、质量和成本为代价的。这两种内置轮电动机在现代电动汽车上都有应用。

2.3.3 再生制动和电动刹车

再生制动是电动汽车所独有的,在减速制动(刹车或者下坡)时,将车辆的部分动能转化为电能,转化的电能储存在储存装置中,如各种蓄电池、超级电容和超高速飞轮。这对于续驶里程不够理想的电动汽车来说是非常重要的。相对于没有再生制动装置的汽车,在城市街道行驶的有再生制动的电动汽车的续驶里程可以提高23%左右。

电动汽车停车制动时,采用开关按钮或者把变速杆扳到停车位置,不采用油压,而是直接通过电线得到电能使电动机动作进行刹车。电动刹车既适用于前端刹车,又适用于后端刹车。

2.3.4 电动汽车两大形式

电动汽车有两大形式,一是对发动机汽车进行改造制成的电动汽车,另外是完全追求电动汽车的特有姿态,彻底做到最适于电动汽车的形式。这两种形式各有优缺点,前者在已有的发动机汽车的基础上加以活用,可以抑制成本上升,在经济地提供给用户的同时,还具备不亚于传统发动机汽车的运行特性;而后者无论在都市内还是在高速公路上,都具有不逊于传统发动机汽车的动力特性和运动特性。

此外,电动汽车的特征技术还包括电池配置,空气阻力降低、质量减小、电动机与电池的冷却等。

2.4 中国纯电动汽车的研发进程

纯电动汽车是“十五”期间我国第一批进入国家汽车产品及生产企业公告的电动汽车,已经在特定区域试验示范运行,并开始批量出口。参与国家电动汽车重大专项的整车单位共开发纯电动客车产品4个,研制试验考核车辆40台;开发纯电动轿车产品两个,研制原型车和示范车25台,百辆级成品车出口。

2.4.1 纯电动客车

纯电动客车课题是科技部与北京市科委共同支持的科技奥运项目之一,主要研究内容包括纯电动客车关键技术研究,定型设计、整车研制和定型试验;纯电动客车动力系统匹配标定与开发平台环境建设;纯电动客车产业化生产基地建设及小批量生产等。

整车承担单位联合有关动力蓄电池、驱动电机单位,以整车产品定型设计为目的,确定了符合实际需求的整车研制及定型设计技术路线,进行了纯电动准低地板、低地板电动公交客车,纯电动豪华旅游客车及纯电动中巴车的整车研制并完成定型试验。在研发过程中,攻克了纯电动客车整车设计及其标准化和系列化、纯电动客车开发流程和产业化、电动机和变速器一体化设计、电池成组管理技术、安全措施与安全装置等许多关键技术。开发的各种类型车辆性能指标都达到技术要求,其中准低地板公交车HFF6110GK50EV和HFF6850GK60EV两种车型作为国内首批获得国家发展和改革委员会《车辆生产企业及产品公告》认可的电动汽车产品,成为国内首批可以正式上路运营的电动汽车。这两种车型现阶段分别在北京市121绿色电动汽车示范线路和密云电动车示范区进行载客运行。

2.4.2 纯电动轿车

纯电动轿车课题是“十五”期间电动汽车重大科技专项经招标安排的研发任务,主要承担单位有天津清源电动车辆有限责任公司、奇瑞汽车有限公司、万向电动汽车有限公司,研究内容包括纯电动轿车整车及其动力总成关键技术研发、定型设计、整车研制和定型试验;纯电动轿车研究开发环境建设等。“十五”期间,我国在纯电动轿车关键零部件研发、系统集成及整车设计研发等方面取得了长足进展。

QR纯电动轿车采用奇瑞汽车有限公司的SQRA级车作为整车开发平台,配置了100Ah高能量密度镍氢动力电池组(能量密度大于 $65\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$)及管理系统;高性能驱动电动机(最大功率大于 60kW)作为能量转换装置;扭矩闭环控制,并具有制动能量回馈功能;电液动力转向系统;电子真空阻力制动系统;电动空调系统;电动冷却系统;整车高压电安全管理系统;智能仪表;整车控制系统;12VDC/DC系统;电子油门;便携式充电系统。主要性能指标为:采用总线通信技术,实现了所有控制器间的数据共享与交互控制,最高车速大于 $120\text{km}/\text{h}$,续航里程大于 200km ,加速时间、爬坡能力、道路通过性能、安全性能与可靠性等指标全部符合国家相关标准。

3 混合动力电动汽车

根据国际机电委员会下属的电力机动车技术委员会的建议,混合动力电动汽车是指由两种和两种以上的储能器、能源或转换器作驱动能源,其中至少有一种能提供电能的车辆称为混合动力电动汽车。

根据这个通用的定义,混合动力电动汽车有很多种形式,有汽油机和蓄电池混合、柴油机和蓄电池混合、蓄电池和燃料电池混合、蓄电池和超大容量电容器混合、蓄电池和飞轮混合、蓄电池和蓄电池混合等。但该定义并未被人们所接受,一般认为混合动力电动汽车就是既有内燃机又有电动机驱动的车辆,燃料电池和蓄电池的混合动力称为燃料电池电动汽车,而蓄电池和电容器的混合动力称为超大容量电容器辅助动力电动汽车等。本节中的混合动力电动汽车均指采用内燃机和电动机的车辆。

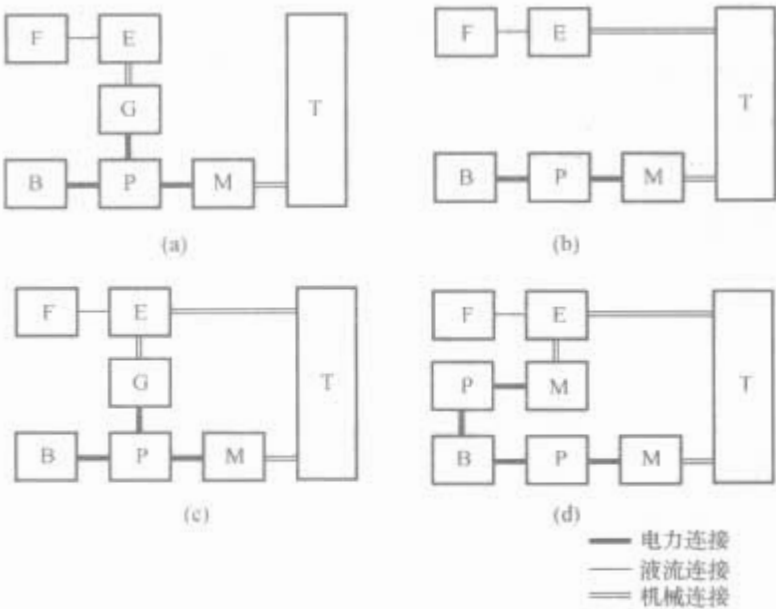
3.1 基本结构

混合动力电动汽车可分为串联式、并联式,以及同时具有串、并联特征的混联式。2000年,混合动力电动汽车的类型进一步延伸为四种:①串联式混合动力电动汽车;②并联式混合动力电动汽车;③混联式混合动力电动汽车;④复合型电动汽车。

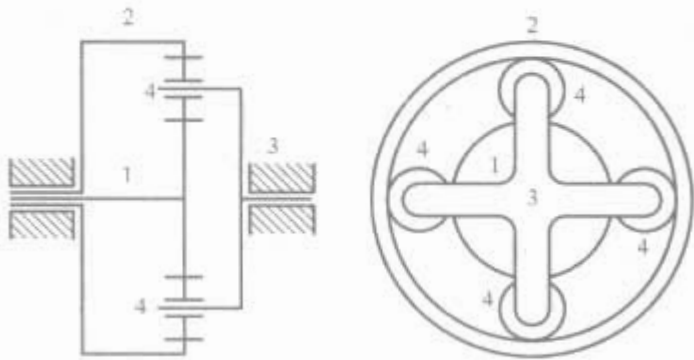
图1.8-23给出了各种混合动力电动汽车的功能框图,图中电气连接是双向的,液流连接没有方向,机械连接也是双向的。

串联混合型的主要特点是在纯电动模式下,内燃机和发电机一起工作产生所需的电能;并联混合型的主要特点是内燃机和与变速器相连的电动机都通过各自的驱动轴驱动车轮;混联混合型就是直接把串联和并联相结合,而复合型则能提供更多更广的工作模式。

为了实现混联式及复合式的混合驾驶模式,内燃机与发电机/电动机之间及电动机与变速器之间必须进行机械连接,其中机械连接装置可以选择行星齿轮机构。图1.8-24显示了混联混合型动力所采用的一套行星齿轮机构,其中太阳轮与发电机相连,齿圈与传动装置相连,行星架与内燃机相连,发动机的动力一部分通过行星齿轮传给齿圈,然后通过



传动轴传给驱动车轮，另一部分动力传给太阳轮经发电机转化为电能。日本丰田公司的 Prius 混合动力电动汽车就是采用这样的行星齿轮装置实现将内燃机的能量分配给电动机和发电机的。



3.1.1 串联式混合动力电动汽车

串联式混合动力电动汽车是混合动力电动汽车中最简单的一种，它由发动机、发电机和驱动电动机三大动力总成组成，如图 1.8-23(a)所示。发动机输出的机械能首先通过发电机转化为电能；转化后的电能一部分用来给蓄电池充电，另一部分经由电动机的传动装置驱动车轮。与燃油车相比，它是一种发动机辅助型电动汽车，发动机并不直接参与驱动，主要是为了增加车辆的行驶里程。

串联式混合动力电动汽车的发动机可采用四冲程内燃机、二冲程内燃机、转子发动机或燃气轮机。发动机的转速控制在一定范围内，不受运行工况的影响，经常保持在低能耗、高效率 and 低污染的状态下运转。

由于在发动机和发电机之间的机械连接装置中没有离合器，因而三大动力总成在车辆底盘上的布置有较大的自由度，控制系统也比较简单。因为只有唯一的电动机驱动模式，所以其动力特性更加趋近于纯电动汽车。

尽管其传动结构简单，但是串联式的三大动力总成的功率都要求等于或接近于车辆的最大驱动功率，因而它体积较大，质量也较大，还有庞大的动力电池组，使得它在中小型汽车上布置有一定的困难，一般适合大型车辆，如公共汽车上采用。不仅如此，由于串联式混合动力电动汽车存在两次

机械能与电能的相互转换，所以它的总效率低于燃油车。

3.1.2 并联式混合动力电动汽车

与串联式不同的是，并联式混合动力电动汽车采用发动机和电动机两套独立的驱动系统驱动车轮。发动机和电动机通常通过不同的离合器来驱动车轮，可以采用发动机单独驱动，电力单独驱动或者发动机和发电机混合驱动三种工作模式驱动。从概念上讲，它是电力辅助型的燃油车，其动力特性更加趋近于内燃机汽车，目的是为了降低排放和燃油消耗。当发动机提供的功率大于驱动电动汽车所需的功率或者再生制动时，电动机工作在发电机状态，将多余的能量充入电池。与串联式相比，并联式混合动力电动汽车只需要两个驱动装置——发动机和电动机，而且在蓄电池放完电之前，如果要得到相同的性能，并联式比串联式的发动机和电动机的体积都要小，可以应用在中小型车辆上。即使是在长途行驶时，发动机的功率也可以达到最大，而电动机的功率只需发出一半即可。混合动力电动轿车多采用并联式结构。

按照驱动力组合的不同，并联式混合动力电动汽车有以下不同的组合模式：

3.1.2.1 发动机轴动力组合式

发动机轴动力组合式只有发动机和电动机/发电机两大动力设备，如图 1.8-25 所示。发动机和电动机/发电机的动力在发动机输出轴上进行组合，然后通过由离合器、变速器、驱动桥和半轴组成的驱动系统带动车轮行驶。日本日野公司的 HIMR 及我国奇瑞汽车有限公司和长安汽车（集团）有限责任公司在“十五”期间研制的混合动力电动汽车都采用这种结构。上海大众汽车有限公司的高尔夫并联混合动力电动汽车也采用类似的结构，不过该车在发动机和电动/发电机之间还布置了一个离合器。

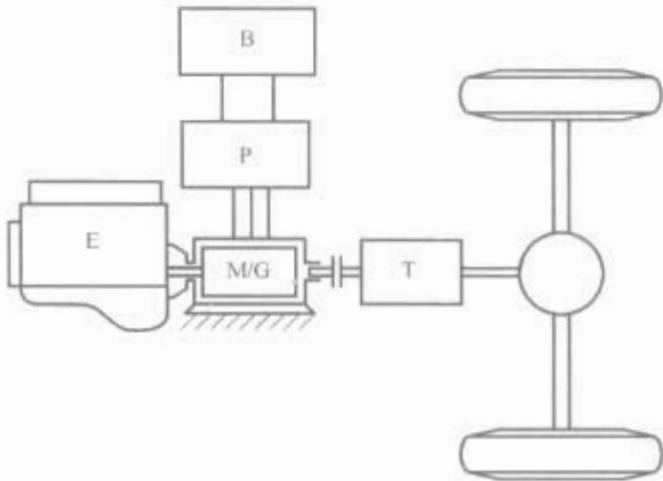


图 1.8-25 发动机轴动力组合式
并联混合动力电动汽车结构图

B—蓄电池; E—内燃机; G—发电机; M—电动机;
P—功率转换器; T—传动装置

3.1.2.2 动力组合器组合式

动力组合器组合式只有发动机和驱动电动机两大动力设备，如图 1.8-26 所示。发动机通过离合器与驱动电动机的动力在动力组合器上进行组合，然后通过变速器、差速器和半轴带动车轮行驶。中国第一汽车集团公司研制的解放牌混合动力城市客车采用的就是这种结构，其所使用的动力组合器为 2:1 固定速比的齿轮箱。

3.1.2.3 驱动轮动力组合式

如图 1.8-27 所示，驱动轮动力组合式的发动机通过离合器、变速器和驱动桥独立驱动后轮（前轮），驱动电动机通过减速器独立地驱动前轮（后轮）。在混合动力驱动模式时，发动机与驱动电动机共同组成四轮驱动，用以驱动整个

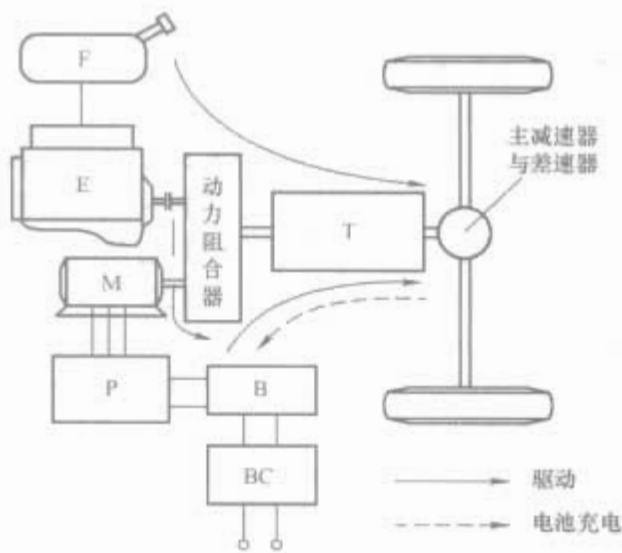


图 1.8-26 动力组合器动力组合式并联混合动力电动汽车结构图

B—蓄电池；BC—电池充电器；F—油箱；E—内燃机；M—电动机；P—功率转换器；T—传动装置

车辆的行驶。戴姆勒—克莱斯勒公司的 Durango TTR 汽车就是采用这种结构，它使用 V6、3.9L 发机构成独立的后轮驱动系统，66kW 三相交流感应电动机构成前轮驱动系统，使得该车的加速性能与 V8 发动机车相差无几，而且燃油经济性得到了 20% 的提升。奥迪公司的 Duo 并联混合动力电动汽车也采用类似结构。

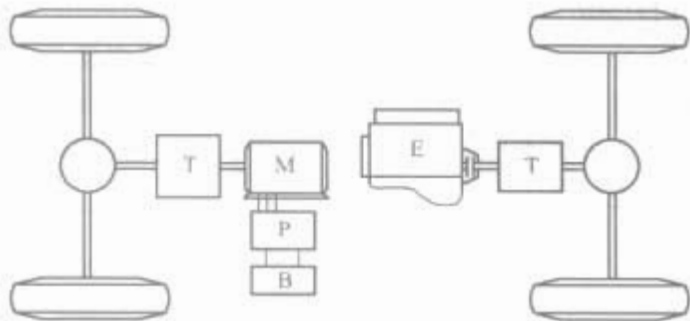


图 1.8-27 驱动轮动力组合式并联混合动力电动汽车结构图

B—蓄电池；E—内燃机；M—电动机；P—功率转换器；T—传动装置

虽然并联式混合动力电动汽车有不同的结构模式，但都是以发动机为主要驱动装置。发动机控制在低油耗、高效率 and 低污染的转速范围内稳定地运转，并直接带动驱动系统驱动车辆行驶，没有并联式结构那样在机械能和电能两次转换过程中的能量损耗。

3.1.3 混联式混合动力电动汽车

混联式混合动力电动汽车在结构上综合了串联式和并联式的特点，与串联式相比，它增加了机械动力的传递路线；与并联式相比，它增加了电能的传输路线。尽管混联式混合动力电动汽车同时具有串联式和并联式的优点，但其结构复杂，成本高；不过随着控制技术和制造技术的发展，一些现代混合动力电动汽车更倾向于选择这种结构。日本日产汽车公司的 Tino 和丰田公司的 Prius 都采用了混联式结构。

3.1.4 复合式混合动力电动汽车

复合式混合动力电动汽车结构更复杂，难以把它归于上述三种中的哪一种。如图 1.8-23(d)所示，其结构与混联式混合动力电动汽车相似，因为它们都有起发电机和电动机作用的电动机，两者的主要区别在于复合型中的电动机允许功率流双向流动，而混联式中的发电机只允许功率流单向流动。双向流动的功率流可以有更多的运行模式。复合式混合动力电动汽车同样具有结构复杂，成本高的缺点，不过，现

在有些新型的混合动力电动汽车也采用这种双轴驱动的复合式系统。日本丰田公司的 Post-Prius，以及美国通用公司的 Precept 采用的是复合式结构。表 1.8-6 总结了常见的串联式、并联式及混联式三种混合动力系统的基本特征。

表 1.8-6 常见的三种混合动力系统的基本特征

串联式	并联式	混联式
发动机可以工作在最大效率点上	车辆构造无需较大改动	可以灵活有效利用能源
尾气排放容易处理，燃油经济性高	系统效率较好	燃油经济性大大提高
不能选择发电用的内燃机	结构简单，可靠性高	系统效率高
配置自由，公共汽车可以实现低地板	一个系统出现故障，另一系统还可以驱动车辆到达安全地带	作为系统，发展空间较大

实际上，除表 1.8-6 中所述特点之外，发动机、电动机/发电机、蓄电池的选定和使用方法、轻量化程度、行驶阻力减小程度等因素共同决定了混合动力电动汽车的特点和性能。

3.2 控制策略

由于各种混合动力电动汽车结构上的差异，因而需要不同的控制策略来调节和控制功率流从不同元件的流进和流出。采用不同控制策略的目的是为了达到不同的目标，其主要目标主要有以下四个：① 最佳的燃油经济性；② 最低的排放；③ 最低的系统成本；④ 最佳的驱动性能。

设计混合动力电动汽车的控制策略时主要应考虑以下几点：

(1) 优化发动机的工作点。基于最佳燃油经济性、最低排放或者两者选其一，根据发动机的转矩—转速特性曲线确定最优工作点。

(2) 优化发动机的工作曲线。如果发动机需要发出不同的功率，相应的最优工作点就构成了发动机的最优工作曲线。图 1.8-28 给出了某发动机的一条典型的优化工作曲线，它是基于最小燃油消耗，即最大燃油经济性作出的。

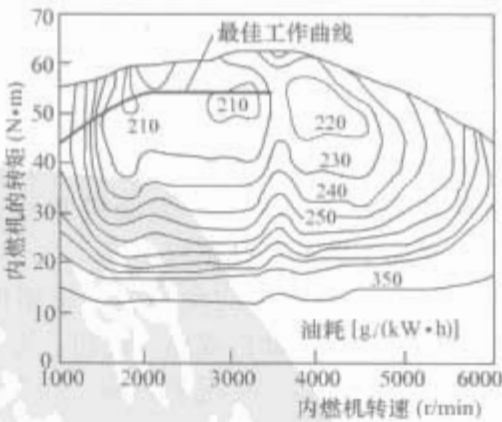


图 1.8-28 内燃机油耗图中的最佳工作曲线

(3) 优化发动机的工作区。在转矩—转速特性曲线上，发动机有一个首选的工作区，在此工作区内，燃油效率最高。

(4) 最小的发动机动态波动。应控制发动机的工作转速，以避免波动，从而使发动机的动态波动达到最小。

(5) 限制发动机最低转速。当发动机低速运行时，燃油效率很低，因而当发动机转速低于某一值时，应切断发动机的工作。

(6) 减少发动机的开/关次数。频繁地开、关发动机，将引起油耗和排放增加，因而应使发动机的开、关次数降低到最少。

(7) 合适的蓄电池荷电状态。蓄电池的容量必须保持在适当的水平，以便在汽车加速时能提供足够的功率，在汽车制动或下坡时能回收能量。若蓄电池的容量过高，应切断发动机的工作或使之怠速运转。

(8) 安全的蓄电池电压。在放电、发电机充电或再生制动时，蓄电池的电压会发生很大变化，应避免蓄电池电压过低或过高，否则蓄电池会产生永久性损坏。

(9) 分工适当。在驱动循环中，发动机和蓄电池应合理分担汽车所需的功率。

(10) 地域选择。在某些城市或地区，混合动力电动汽车应以纯电动的模式工作进行工作，这种转变可以通过手动或自动来控制。

3.2.1 串联式混合动力电动汽车控制

串联混合动力电动汽车的功率流控制可以用如下四种工作模式来描述，如图 1.8-29 所示。当车辆启动、正常行驶或加速行驶时，发动机通过发电机和蓄电池一起输出电能并传递给功率转换器，然后驱动电动机，通过机械传动装置驱动车轮；当车辆轻载时，发动机发出的功率大于车辆所需要的功率，多余的能量通过发电机给蓄电池充电，直到蓄电池剩余电量达到预定的限值；当车辆制动或减速时，电动机把驱动轮的动能转化为电能，并通过功率转换器给蓄电池充电；当车辆停车时，发动机也可以通过发电机和功率转换器给蓄电池充电。

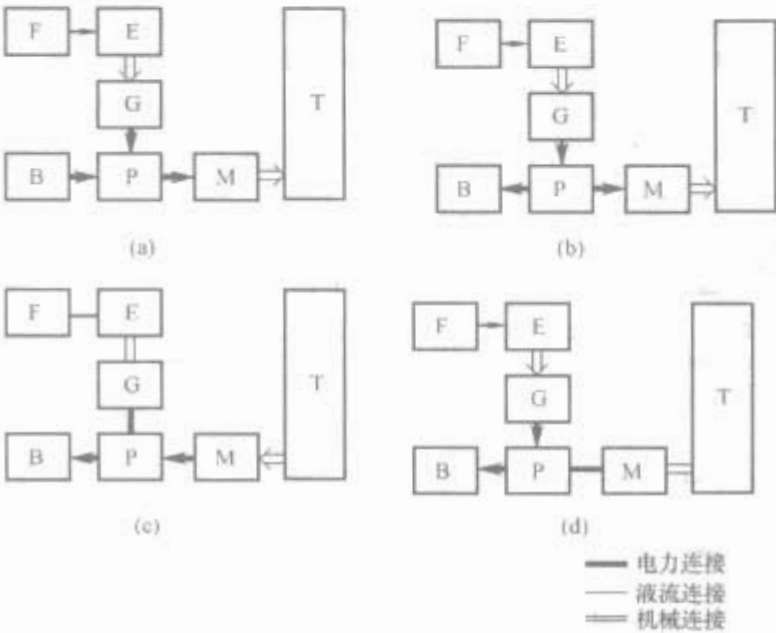


图 1.8-29 串联式混合动力电动汽车的工作模式
(a) 启动/正常行驶/加速；(b) 轻载；
(c) 减速/制动；(d) 蓄电池充电
B—蓄电池；E—内燃机；F—油箱；G—发电机；
M—电动机；P—功率转换器；T—传动装置
(包括制动器、离合器和齿轮箱)

3.2.2 并联式混合动力电动汽车控制

由于并联方式的不同，并联混合动力电动汽车的控制策略也略微有所不同。图 1.8-30 给出了一种并联混合动力电动汽车的四种工作模式。当车辆启动或节气门全开加速时，发动机和电动机同时工作，共同分担驱动车辆所需的动力，比如发动机和电动机分别承担总功率的 80% 和 20%；当车辆正常行驶时，电动机关闭，仅由发动机工作提供车辆行驶所需的动力；当车辆制动或减速行驶时，电动机工作于发电模式，通过功率转换器给蓄电池充电。由于发动机和电动机驱动同一根驱动轴，因此当车辆轻载时，发动机发出的功率也可以通过电动机转化为电能给蓄电池充电。日本本田 Insight 采用的就是类似的功率流控制方式。

机驱动同一根驱动轴，因此当车辆轻载时，发动机发出的功率也可以通过电动机转化为电能给蓄电池充电。日本本田 Insight 采用的就是类似的功率流控制方式。

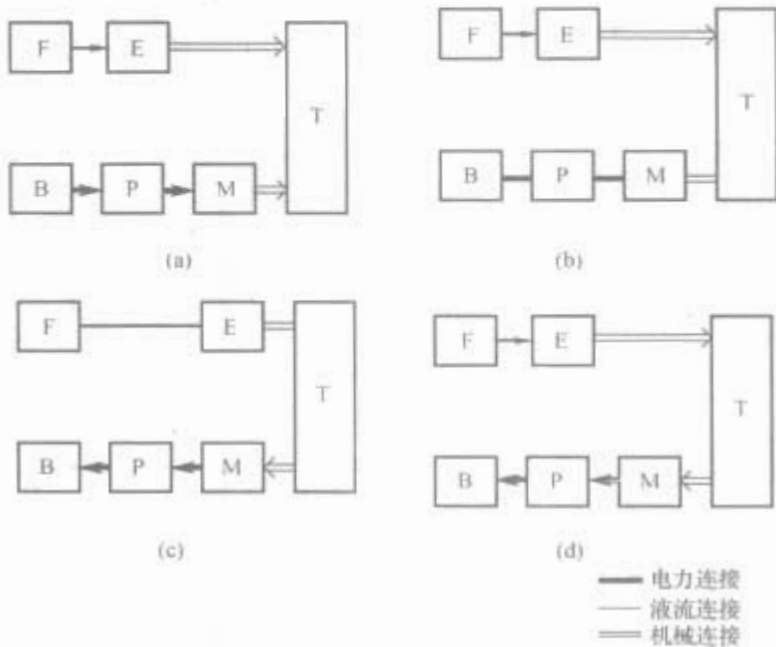


图 1.8-30 并联式混合动力电动汽车的工作模式
(a) 启动/加速；(b) 正常行驶；(c) 减速/制动；
(d) 行驶中给蓄电池充电
B—蓄电池；E—内燃机；F—油箱；M—电动机；
P—功率转换器；T—传动装置
(包括制动器、离合器和齿轮箱)

另外，德国大众汽车公司的高尔夫车，发动机通过离合器带动电动机/发电机，输出转矩再通过另一个离合器驱动车辆行驶。当汽车静止启动时，蓄电池向电动机/发电机供电，此时电动机/发电机就是发动机的起动机。发动机启动后，发动机一方面作为车辆单独的动力源驱动车轮，另一方面又带动电动机/发电机发电向蓄电池充电，此时与传统汽车一样。在市区行驶时，为达到零排放，发动机关闭，离合器 1 脱开，离合器 2 接合，蓄电池作为唯一能源向电动机供电，由电动机取代发动机驱动车轮。当车辆需要高速或高负荷时，发动机启动，离合器 1 闭合，发动机与电动机/发电机系统组成复合驱动形式，以最大功率驱动车辆。

3.2.3 混联式混合动力电动汽车控制

混联式混合动力电动汽车兼有串联和并联混合动力电动汽车的特点，因而有很多种可能的控制方式。基本上可分成两种，一种称为发动机主动型，另一种称为电力主动型。车辆运行时，前一种主要是发动机起作用，而后一种主要是电动机起作用。

图 1.8-31 给出了发动机主动型的六种工作模式。当车辆启动时，发动机关闭，蓄电池工作提供车辆行驶所需的动力；当节气门全开，车辆加速行驶时，发动机和电动机同时工作，共同分担车辆行驶所需的动力；当车辆正常行驶时，电动机关闭，发动机工作，提供车辆所需的动力；当车辆制动或减速行驶时，电动机工作于发电模式，通过功率转换器给蓄电池充电；当车辆行驶给蓄电池充电时，发动机一部分动力用于驱动车辆，另一部分动力由发电机经功率转换器给蓄电池充电；当停车时，发动机也可以通过发电机给蓄电池充电。目前，日本日产 Tino (Inada, 2000) 混合动力电动汽车就采用了类似的功率流控制方法。

图 1.8-32 显示了电力主动型的六种工作模式。当车辆启动或轻载运行时，发动机关闭，由蓄电池给电动机提供电能驱动车辆；当车辆正常行驶或节气门全开，车辆加速行驶

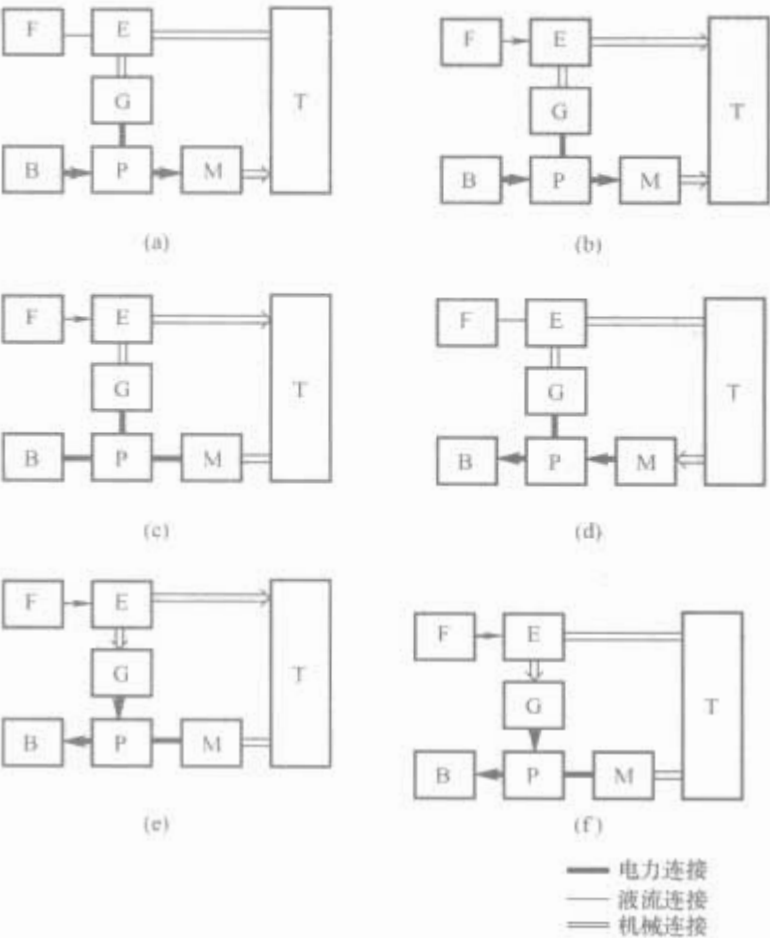


图 1.8-31 发动机主动型混联式混合动力电动汽车的工作模式
(a) 启动；(b) 加速；(c) 正常行驶；(d) 减速/制动；
(e) 行驶中给蓄电池充电；(f) 蓄电池充电
B—蓄电池；E—内燃机；F—油箱；G—发电机；M—电动机；
P—功率转换器；T—传动装置（包括制动器，离合器和齿轮箱）

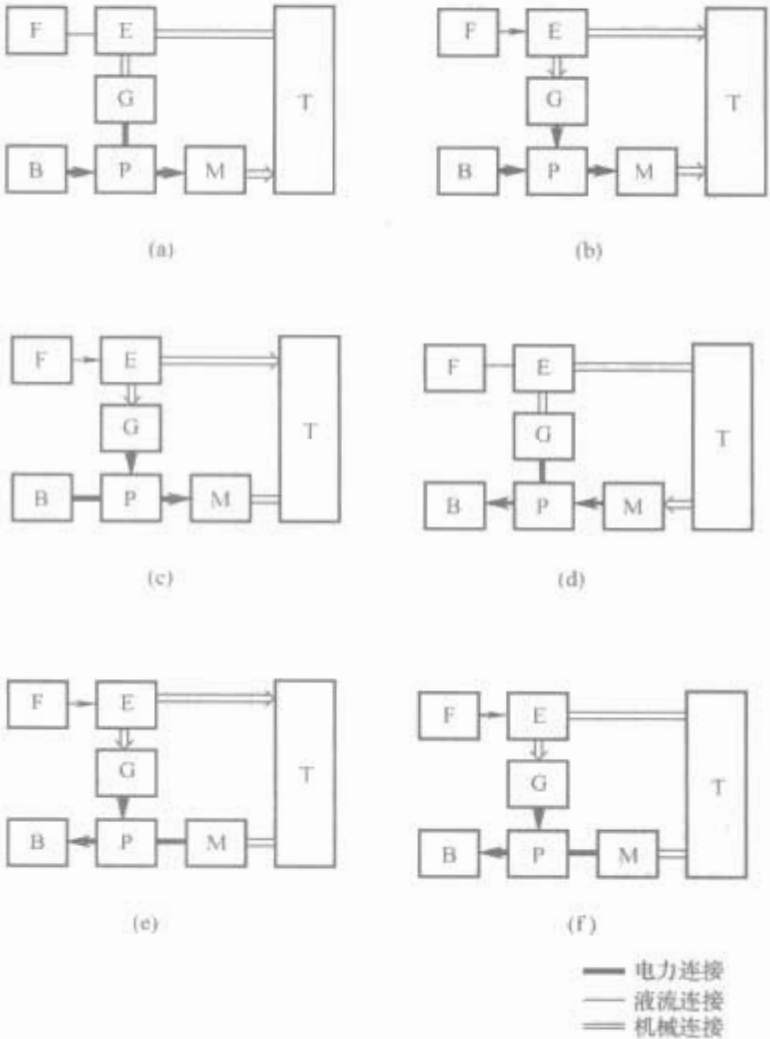


图 1.8-32 电力主动型混联式混合动力电动汽车的工作模式
(a) 启动/轻载；(b) 加速；(c) 正常行驶；(d) 减速/制动；
(e) 行驶中给蓄电池充电；(f) 蓄电池充电
B—蓄电池；E—内燃机；F—油箱；G—发电机；M—电动机；
P—功率转换器；T—传动装置（包括制动器，离合器和齿轮箱）

时，发动机和电动机一起工作，共同提供车辆所需的功率。这两种工况的区别在于，车辆正常行驶的动力仅由发动机驱动发电机提供，而当节气门全开，车辆加速行驶时，其动力由蓄电池和发电机共同提供，通常用行星齿轮机构分流发动机的输出功率，一部分用于驱动车辆，另一部分用来驱动发电机；当车辆制动或减速行驶时，电动机工作于发电机模式，并通过功率转换器给蓄电池充电；当车辆行驶给蓄电池充电时，发动机一部分动力用于驱动车辆，另一部分动力用于驱动发电机给蓄电池充电；当停车时，发动机也可以通过发电机给蓄电池充电。日本丰田 Prius 混合动力电动汽车就采用了这种功率流控制方式。

3.2.4 复合式混合动力电动汽车控制

复合式混合动力电动汽车的发展主要集中于双轴驱动混合动力系统，在这种系统中，前轴和后轴独立驱动，前轮和后轮之间没有任何驱动轴或转换器相连，这样可以减轻驱动系统的质量，增加车辆装配的灵活性；而且，这样能同时回收四个车轮的制动动能，可以大大提高车辆的燃油利用率和燃油经济性。

图 1.8-33 显示了一种双轴复合式混合动力系统，其中前轮是混合动力驱动，后轮由电动机驱动，该系统共有六种工作模式。当车辆处于启动工况时，发动机关闭，由电池组分别向车辆前、后驱动轴的电动机供电并驱动前、后轴；当节气门全开，车辆加速行驶时，发动机和两个电动机同时工作，提供车辆行驶所需的功率；当车辆正常行驶或电池充电时，发动机发出的功率被分流，一部分用于驱动前轴，另一部分通过工作于发电机模式的电动机给蓄电池充电，发动机与前轴的电动机、发动机与前轴通常用行星齿轮机构连接；当车辆处于轻载工况时，发动机和后电机关闭，前驱动轴由蓄电池和前轴电动机驱动；当车辆处于减速制动工况时，前、后电动机均以发电机模式工作，实现四个车轮同时再生

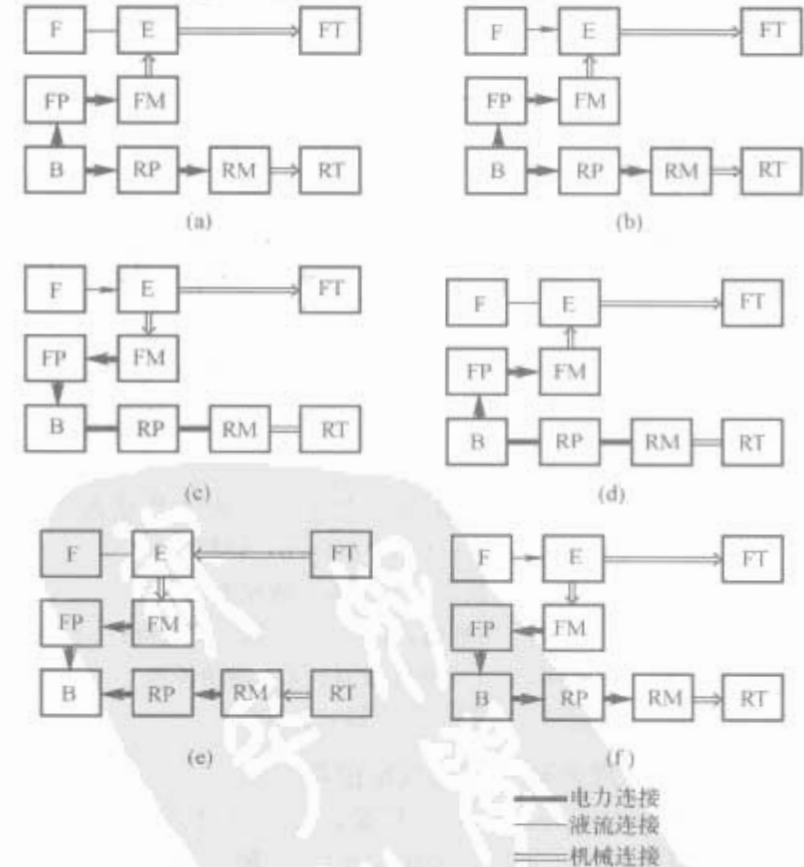


图 1.8-33 双轴复合式（前轴混合驱动后轴电力驱动）混合动力电动汽车的工作模式
(a) 启动；(b) 加速；(c) 正常行驶/蓄电池充电；
(d) 轻载；(e) 减速/制动；(f) 轴间平衡
B—蓄电池；E—内燃机；F—油箱；FM—前轮电动机；
FP—前轮功率转换器；FT—前轴传动装置；
RP—后轮功率转换器；RT—后轴传动装置

制动。这种双轴驱动系统具有轴平衡的功能，若前驱动轴打滑，与该驱动轴相连的电动机以发电机模式工作，吸收发动机输出的部分能量，并转化为电能输出到与后驱动轴相连的电动机，由电池组实现功率流之间的分配调整。日本丰田 Post-Prius 中的 THS-C 采用的就是这种功率流控制方式。

图 1.8-34 所示为另一种双轴复合式混合动力系统，其中前轮由电动机驱动，后轮是混合动力驱动，该系统共有六种驱动模式。当车辆启动时，电池组只向前电动机供电驱动前轴，而发动机和后电动机均关闭；当车辆开始行驶时，电池组也向后电动机供电使发动机加速运转，从而启动发动机；当节气门全开，车辆加速行驶时，前电动机驱动前驱动轴，而后轴由发动机和后电动机一起驱动，这时，共有三个驱动装置（一个发动机，两个电动机）一起驱动车辆；当车辆正常行驶时，仅由发动机驱动后轴；当车辆减速/制动时，电动机以发电机模式工作，四个车轮同时再生制动；当车辆行驶给电池组充电时，发动机发出的功率一部分用于驱动后轴。另一部分通过发电机给蓄电池充电。美国通用公司的 Precept 采用的就是这种功率流控制方式。

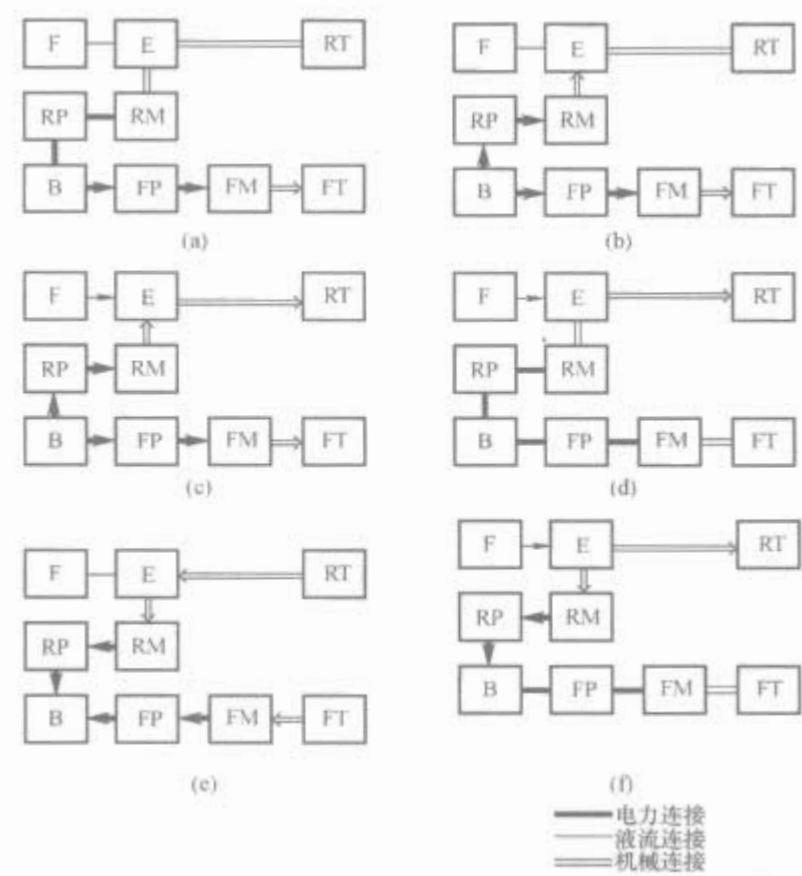


图 1.8-34 双轴复合式（前轴电力驱动后轴混合驱动）混合动力电动汽车的工作模式
(a) 启动；(b) 启动发动机；(c) 加速；(d) 正常行驶；
(e) 减速/制动；(f) 行驶过程中给蓄电池充电
B—蓄电池；E—内燃机；F—油箱；FM—前轮电动机；
FP—前轮功率转换器；FT—前轮传动装置；RM—后轮电动机；RP—后轮功率转换器；RT—后轴传动装置

3.3 混合动力电动汽车发展动态

3.3.1 美国

3.3.1.1 通用汽车公司

通用汽车公司在 1998 年 1 月发布了在 EV1 纯电动汽车基础上改造的 4 座并联式混合动力电动汽车和串联式混合动力电动汽车的原型车，保留了 EV1 纯电动汽车的前轮驱动装置。

并联式混合动力电动汽车 EV1 将 44 个镍氢电池置于车身下部的前半部分，3 缸、1.3L、53kW 涡轮柴油发动机置于后车轴的前部，发动机的输出功率通过 5 级自动变速器传

向后轮。变速器的一端通过传动装置连接有作为起动发电机的 4.5kW 永磁无刷直流电动机，可完成发动机的起动、车辆的驱动、发电、制动时的能量回收等功能。当车辆在标准“混合动力”模式行驶时，前部的电动机驱动前轮，后部的发动机对蓄电池进行充电，使电池的充电状态维持在满充电状态的 80%；当车辆在易滑坡等路面行驶时，为四轮驱动；当车辆全力加速时，后部的起动机/发电机、发动机及前部的电动机的驱动力全部使用时的输出功率为 153kW。车速从 0 到 100km/h 加速时间为 7s，最高时速限制在 129km/h。

串联式混合动力电动汽车 EV1 是用连接有永磁交流发电机的燃气轮机 APU（辅助动力装置）来替换并联式混合动力电动汽车的柴油发动机，APU 产生的电力给驱动前轮电动机的镍氢电池充电。燃气轮机的回转速度为 10 万~14 万 r/min，功率为 40kW。当车辆在普通的“混合动力”模式下行驶时，当电池在满充电的 40% 以下状态时，APU 开始运行给电池充电，充电后，从 ZEV 模式行驶 40km 后变为“混合动力”驱动行驶模式。APU 一起动，即使前部的电动机全力驱动，电池的充电状态也会处于满充电的 50%。串联式的 EV1 比并联式 EV1 轻，在 ZEV 模式下可行驶 64km，续驶里程在 563km 以上，燃油经济性为 25.5km/L，车速从 0 到 100km/h 的加速时间为 9s，最高车速为 129km/h。

2000 年 1 月，美国通用汽车公司发布了燃油经济性为 34km/L 的并联式混合动力电动汽车 Puriseputo，整体构成与并联式混合 EV1 很相似。Puriseputo 采用水冷 35kW 的三相交流电动机驱动前轮，3 缸、1.3L、40kW 的涡轮增压柴油发动机通过 5 级变速器及减速机构驱动后轮。变速器旁边连接有 10kW 的多功能单元，用来完成发动机的起动、发电和后轮驱动。

3.3.1.2 福特汽车公司

2000 年初，福特汽车公司发布了 5 座、4 门并联式混合动力电动汽车 Prodigy，燃油经济性达到 33.2km/L，续驶里程为 1056km。该车采用的 4 缸、1.2L、55kW 柴油发动机，为前置横放，35kW 电动机具有起动机和发电机的双重功能，并与发动机一起构成了前轮驱动的并联式混合动力系统。停车时，发动机停止运转，并在 0.2s 内起动发动机。

福特汽车公司的另一款混合动力多用途车 Escape 采用 2.3L、93kW 阿特金森循环发动机，和 70kW 永磁同步电动机作驱动。四轮驱动时，其燃油经济性可达到 12.5km/L。

3.3.1.3 戴姆勒—克莱斯勒汽车公司

1996 年，克莱斯勒汽车公司发布了 5 座、4 门、并联式混合动力电动汽车 ESX；1998 年又发布了其改进型 ESX2；2000 年发布了燃油经济性为 30.6km/L 的 ESX3。该车采用 3 缸、1.5L、55kW 柴油发动机和 15kW 永磁电动机作驱动，电池采用 SAFT 制造的 21kW、48kg 的锂离子电池。

1999 年，戴姆勒—克莱斯勒汽车公司发布了 Citadel 四轮驱动并联混合动力电动汽车。前置的发动机用于驱动后轮，电动机用来驱动前轮，戴姆勒—克莱斯勒汽车公司将其命名为 TTR，即通过道路使发动机和电动机的动力进行组合。同年，在德国，以奔驰的四轮驱动车 E-2804matic 为基础，该公司发布了 TTR 混合动力电动汽车 Hymatic，在原来配置减速机构的位置配置了驱动用电动机，后轮驱动系统没有改变。

3.3.2 日本

3.3.2.1 丰田汽车公司

1997 年，丰田汽车公司开始销售 5 座的混合动力电动

轿车 Prius，是世界上第一种大批量生产的混合动力电动汽车。2000 年销售的 Prius 采用 4 缸，1.5L，52kW 阿特金森循环发动机，和 33kW 永磁同步电动机共同驱动。Prius 的最高车速为 160km/h，车速从 0 到 96km/h 的加速时间为 12.7s，10.15 城市循环工况下的燃油经济性为 29km/L，市区和公路的复合工况的燃油经济性为 20km/L。在最新一代 Prius 上搭载了改进的混合动力驱动系统 THS II，发动机最大功率提升到 57kW，电动机电压达到了 500V，使输出功率增大到 50kW；与此相匹配，发电机的最大转速从 6500r/min 提高到 10000r/min，车速从 0 到 96km/h 的加速时间为 10.7s。整车性能水平已超过采用 2.0L 发动机的普通轿车，燃油经济性在 10.15 城市循环工况下达到 35.5km/L。

Prius 是发动机主动型混合动力电动汽车，它将发动机输出的动力通过行星齿轮机构分解为发电机的驱动力和车轮的驱动力。发电机产生的电力一边供给车轮驱动用的电动机，一边通过变换器把交流电转换成直流电给蓄电池充电。电池又通过变换器把直流电变成交流电给驱动电动机供电来驱动车轮，此部分为串联式混合动力部分。另一方面，尽管发动机输出功率可以用于驱动车轮，但在驱动轴上还有电动机，还可通过电动机增加输出功率，此部分为并联式混合动力部分。因此，Prius 是混联式混合动力电动汽车，此驱动系统被称为丰田混合动力系统 THS。图 1.8-35 所示为 Prius 的动力分配装置及截面图。

这种驱动系统有 5 种基本的工作模式，即起动、低速，普通行驶，全力加速，减速、制动，停止。起动时，当车辆以极低的速度行驶或缓慢下坡时，发动机在低效区运行，这时将发动机停止，让电动机单独驱动来行驶，如图 1.8-36(a)所示。当车辆普通行驶时，发动机和电动机共同驱动车轮，如图 1.8-36(b)所示。当车辆全力加速时，发动机保持最高转速，输出最大的功率，电池也输出电力，这样，与同排量的传统发动机相比，车辆的加速性能提高了 10%，如图 1.8-36(c)所示。当车辆制动时，停止发动机的空转，车轮驱动电动机发电运行，给电池充电，这样，车辆的一部分制动能量将得到回收，并储存在电池中，提高了燃油经济性，如图 1.8-36(d)所示。当车辆停止时，发动机也自动停

止，在避免能量损失的同时，也避免了尾气排放。另外，为维持蓄电池电量在合理的范围内，发动机在必要时还将给蓄电池充电，如图 1.8-36(e)所示。

此外，丰田汽车公司还开发了其他混合动力电动汽车，如 2001 年 6 月，丰田汽车公司上市了混合动力系统驱动的七八座多用途车——Estima 混合动力四轮驱动汽车。在前轮驱动的 Prius 系统上，Estima 增加了后轮驱动部分，电动机、带式无级变速器和 2.4L 的高效汽油发机构成 THS-C 混合动力系统。发动机与一部 13kW 电动机驱动前轮，另一部 18kW 电动机驱动后轮，由此构成了驱动轮并联系统。

2001 年 8 月，丰田汽车公司发布了配置丰田轻度混合动力系统 THS-M 的皇冠 Loyal Saloon。THS-M 系统由 6 缸、3L、147kW 的发动机和 3kW 的交流同步电动机组成，在 10.15 城市循环工况下，该车的燃油经济性为 13km/L。THS-M 系统结构比较简单，具有容易配置的特性，有一定的通用性，可以适用于各种车型。当车辆停止时，发动机自动停止，通过起动发电机同时完成车辆和发动机的起动；当车辆正常行驶时，起动发电机根据需要给蓄电池充电；当车辆减速、制动时通过起动发电机将一部分车辆动能回收，转化为电力返回电池。当车辆怠速停止时，通过电动机驱动空调压缩机来调节车内温度。

3.3.2.2 本田汽车公司

1999 年秋，本田汽车公司上市了全球油耗最低的量产混合动力电动汽车 Insight，在 10.15 城市循环工况下，其燃油经济性为 35km/L。该车采用本田公司独特的混合动力系统 IMA，以 3 缸、1.0L、50kW 汽油发动机作为主要动力，10kW 无刷直流电动机作为辅助动力，蓄电池为 144V、6.5A·h 的镍氢电池，电池组可利用正常行驶的富裕功率和下坡时的再生制动能量充电。

本田汽车公司最新开发出的新一代混合动力电动汽车 Civic，采用 3 级 i-VTEC+IMA 概念，即 3 级 i-VTEC 发动机（70kW，6000r/min）加上改进的混合动力系统 IMA，电动机采用 15kW 的直流无刷电动机。在 10.15 城市循环工况下，Civic 将燃油经济性提高到 31km/L。Civic 的主要工作模式为：当车辆起动、加速时，发动机处于低转速节气门

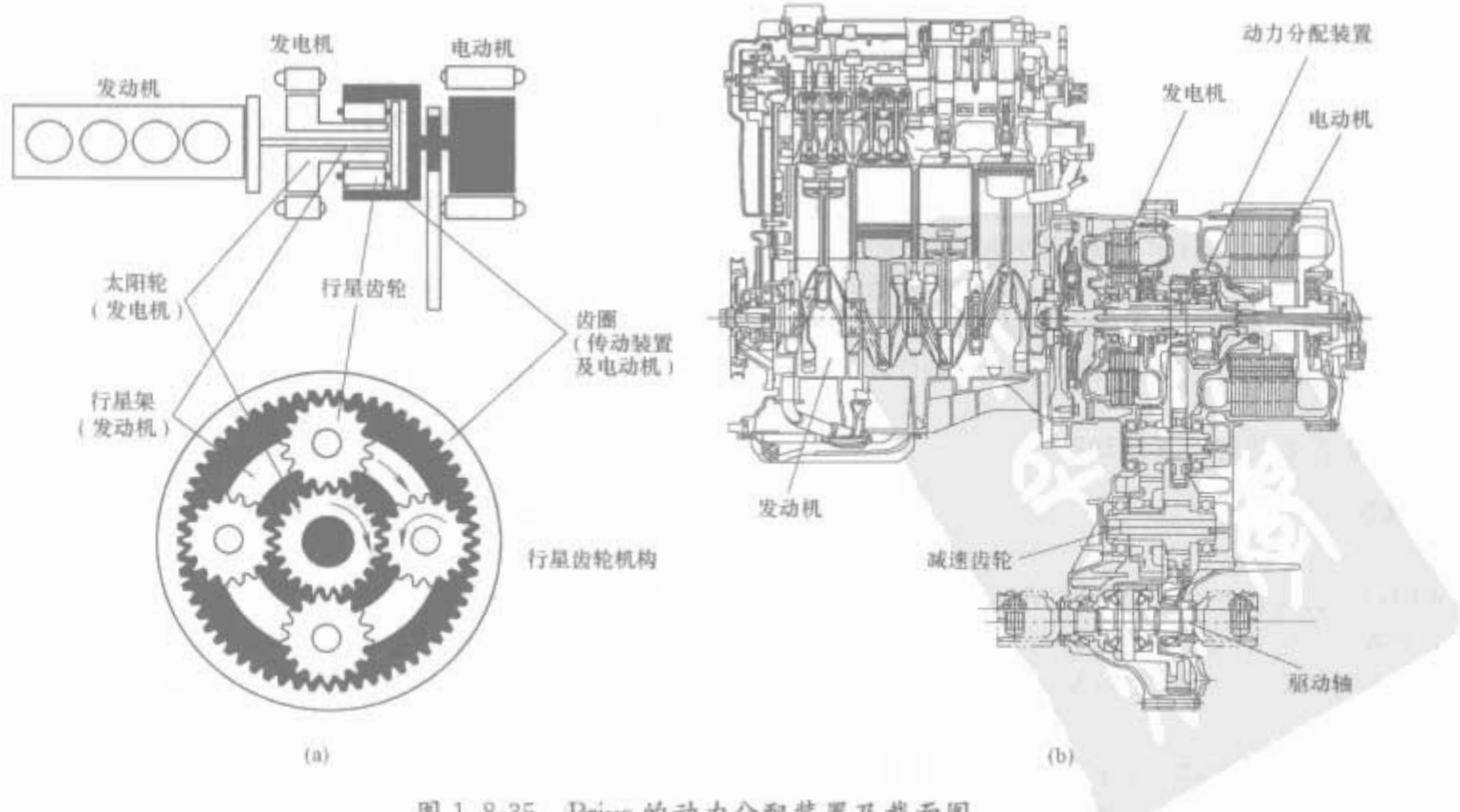


图 1.8-35 Prius 的动力分配装置及截面图
(a) Prius 的动力分配装置；(b) Prius 动力系统截面图

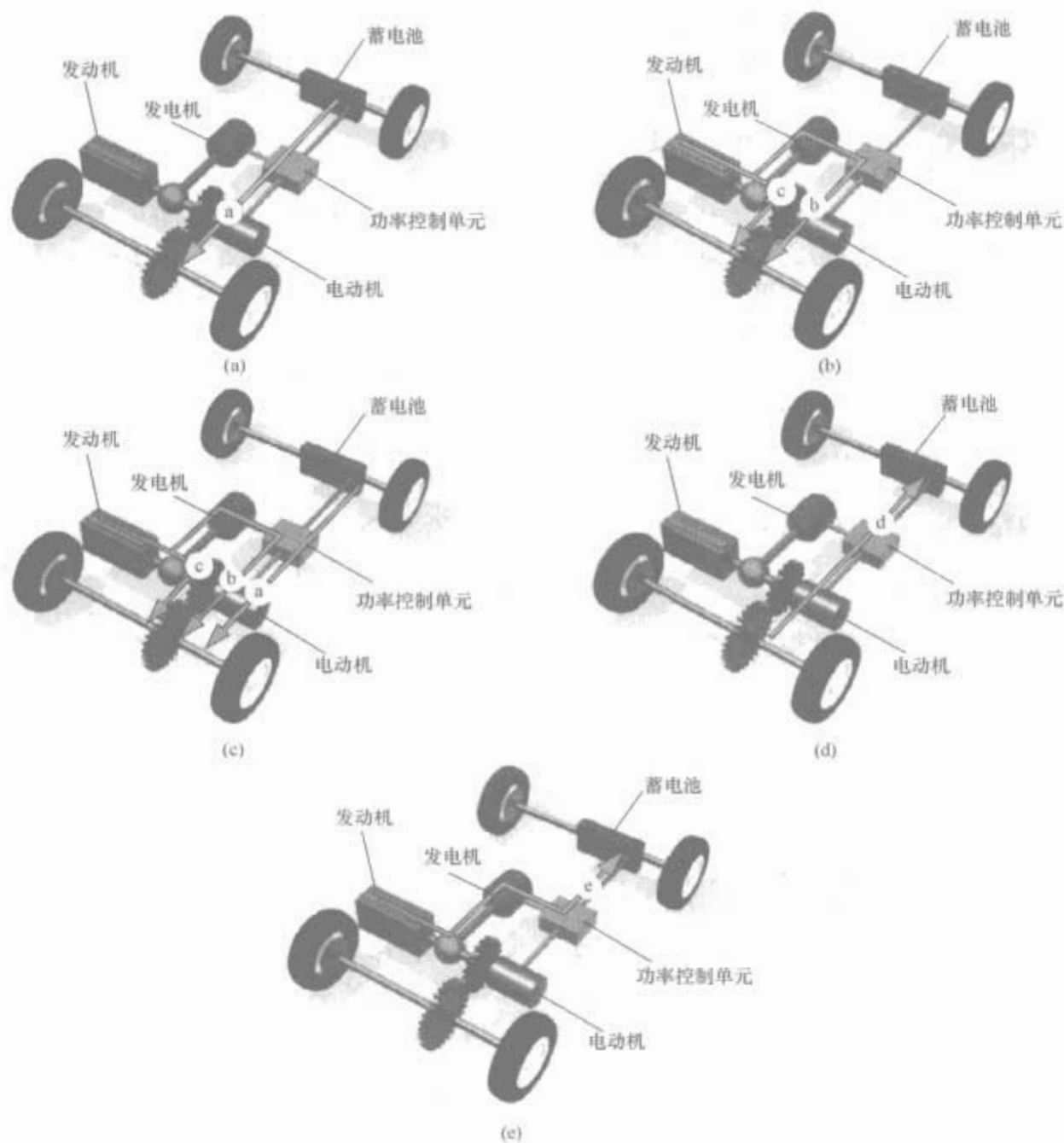


图 1.8-36 Prius 的工作模式

(a) 启动/轻载；(b) 普通行驶；(c) 全力加速；(d) 减速制动；(e) 蓄电池充电

正时状态驱动行驶，并由电动机辅助驱动；当缓慢加速时，发动机处于低转速节气门正时状态驱动行驶；当车辆低速巡航时，发动机 4 个气缸的节气门全部关闭，只靠电动机驱动行驶；当车辆急加速时，发动机处于高转速节气门正时状态驱动行驶，并由电动机辅助驱动；当车辆高速巡航时，发动机处于低转速节气门正时状态驱动行驶；当车辆减速时，发动机 4 个气缸的节气门全部关闭，电动机最大限度地回收制动能量，储存到电池里。

3.3.2.3 日野汽车公司

日野汽车公司在 1991 年发布了与大众高尔夫车相似的并联混合式电动汽车 HIMR。HIMR 将起动机、电动机、发电机、减速器、飞轮集成在一起的薄型三相交流电动机置于发动机的原飞轮位置，外部尺寸基本上没有变化。蓄电池由 25 个 12V 铅酸电池串联组成，后来又改为镍氢电池。加速时，车辆由发动机和电动机共同驱动；低速时，电动机的大转矩补偿了发动机的小转矩，显著降低了发动机的排放。除了制动能量回馈以外，根据行驶时的状况自动发电来给蓄电池充电。

HIMR 混合动力电动汽车可以节约燃油 5%~15%，降低 NO_x 的排放为 20%~30%，黑烟、颗粒排放物减少 55%~70%，加速噪声可降低 2~3dB，排气减速器的使用使制动力增大了约 2.6 倍。

2000 年，日野汽车公司与大发汽车公司一同展出了装载类似 HIMR 的混合动力系统 Atore 混合动力轻型公交车。

它使用 3 缸，660mL，双凸轮，可变电磁阀的 30kW 发动机和交流同步电动机，以及镍氢电池，加速性能超过普通的燃油汽车，燃油经济性提高了 30%，并实现了超低排放。

3.3.3 欧洲

3.3.3.1 德国大众汽车公司

大众汽车公司在 1990 年发布了由高尔夫车改造而成的前轮驱动的并联式混合动力电动汽车，其结构如图 1.8-37 所示。该车采用横置 1.6L、44kW 柴油发动机，以额定功率为 6kW（最大 9kW）的三相交流电动机作驱动。整车质量为 1200kg，当车辆只有发动机驱动时，最高车速可以达到 150km/h。在市内时速 60km/h 以下时可以用电动机来驱动，急加速、爬坡或者郊外行驶时，自动切换为发动机驱动。由起动机、电动机、发电机、减速器（辅助刹车）、飞轮一体化构成的回转机代替了发动机的飞轮。在回转机的两侧设计了负压动作的离合器，由电子控制器根据不同的状况

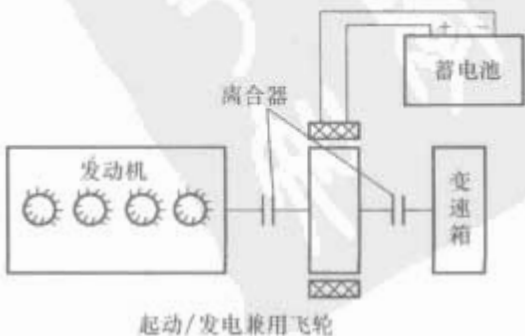


图 1.8-37 高尔夫混合动力电动汽车的结构

控制离合器的开合。72V 蓄电池可以采用铅酸电池（质量为 195kg）、镍镉电池（质量为 140kg），以及钠硫电池（质量为 110kg）。

该车不是通过发动机给蓄电池充电，而是通过电网充电，一次充电的续驶里程可以达到 20~25km（使用钠硫电池的情况下为 45~50km）。当车辆减速或制动时，通过发电将能量回收，刹车踏板踩下的最初三分之一时间只进行发电能量回收。乘车车门一打开，离合器动作电动负压泵就开始启动，驾驶员通过选择开关和离合器的动作来选择发动机驱动、电力驱动或混合驱动中的任一种行驶方式。

高尔夫车的排放值最多可以比普通柴油汽车降低一半，如果将发电厂的排放也考虑进去的话，CO₂的排放量可对应普通柴油汽车的 226g/km。在德国，发电主要以核电为主，这一指标可降低到 147g/km，而在以清洁水力发电为主的瑞士，可减少到 90g/km。

在高尔夫车之后，大众汽车公司将研究方向转移到了具有飞轮、启动、发电三种功能的性价比很高的 SSG 系统。

3.3.3.2 法国雪铁龙汽车公司

雪铁龙汽车公司在 1998 年将发动机车 Xsara 改造成由发动机、电机构成的并联式混合动力系统的 Xsara Dynalto，在 2000 年发布了性能提高后的 Xsara Dynactive。

Xsara Dynalto 和大众汽车公司的高尔夫车相似，用直径为 300mm、宽为 65mm 的启动发电机（功率 7kW，1500~6000r/min）来代替汽油发动机（65kW，5600r/min）的飞轮，并和 5 级变速器相连，从开关开启到启动只需 0.1s。当发动机低速运转、转矩输出不足时，通过电动机补充转矩，使得车辆更容易驾驶；在急加速的情况下，通过电动机来辅助发动机；在 2s 以上的停车情况下，使发动机停止运转，减少了燃油消耗、排放和噪声。

改进型的 Xsara Dynactive 在发动机（55kW，5500r/min）和自动变速器之间配置了 25kW（2000~6000r/min）的永磁同步电动机，通过电动机来启动发动机，在发动机高效的转速区用发动机驱动行驶，在减速、制动时进行能量回馈，暂时停车时使发动机停止运转。Xsara Dynactive 的最高车速为 170km/h，车速从 0 到 100km/h 的加速时间为 12.6s，作为零排放、纯电动汽车的续驶里程为 20km，正常续驶里程为 1000km，燃油经济性为 19.2km/L。

雪铁龙汽车公司还研发了 Berlingo Dynavolt 串联式混合动力电动汽车。该车采用两缸柴油发动机、8kW 启动发电机及一台驱动电动机作驱动。在市区内行驶时，Dynavolt 工作在纯电动模式。当车速低于 70km/h 时，车辆不发电；在 80km/h 时速下，续驶里程为 150km；在“自动”模式下，

Dynavolt 的续驶里程可以延长到 260km。

3.3.3.3 雷诺汽车公司

雷诺汽车公司也研究、试制了各种各样不同的混合动力电动汽车，如 1998 年公开的 Scenic Hymne 是在量产车 Scenic 的 1.6L、80kW 汽油发动机的基础上增加 30kW 永磁同步电动机，并与发动机并联，手动变速器换为自动变速器，140kg 的镍镉电池置于车身下面，构成混合动力系统。当车辆在市内低速行驶时，只靠电动机驱动可以行驶 25~30km；当加速到 60km/h 时，发动机也开始运转，进行急加速；在高速公路上，只靠发动机驱动行驶；超车或爬坡时，电动机也开始工作。

3.3.4 中国

“九五”期间，中国开始真正研发混合动力电动汽车。“九五”末期，国内部分研究机构、大专院校和企业开展了混合动力汽车的研究；进行串联、并联形式的功能性探讨。东风汽车公司先后开展了纯电动、混合动力及燃料电池汽车的研发，并制作出样车。其中，混合动力客车样车采用并联式机电耦合方案，选用了当时市场易得的铅酸电池和交流感应电动机。其间所进行的仅仅是对混合动力电动汽车的结构布置和控制方式的概念性研究，只实现了部分功能。此外，清华大学、武汉理工大学等单位也进行了混合动力电动汽车的研究。

“十五”期间，国家启动了“863”计划能源领域电动汽车重大专项，经过 3 轮研发，专项完成了混合动力电动汽车功能样车、性能样车和初步产品样车的开发，样车的技术指标基本达到了专项的指标要求，初步具备产业化条件。

东风汽车公司研制的 EQ7200HEV 混合动力轿车采用具有自主知识产权和品牌的 EQ7200 型轿车底盘作为混合动力轿车的开发平台，发动机采用富康轿车电喷汽油机，将富康 5 挡机械变速器改为机械式自动变速器，实现了发动机和电动机两个动力源的有机耦合。同时，采用集成启动发动机代替原有的启动机和发动机，改装了原有的传动轴总成，将冷却系统、制动系统、转向系统改造成电动操作。EQ7200HEV 混合动力轿车采用混联式的机电耦合方案，可实现 10 种基本的工作模式，控制策略灵活多样，其整车配置及性能指标变化见表 1.8-7 和表 1.8-8。

除此以外，东风汽车公司还开发了 EQ6110HEV 并联型混合动力公交车，它以成熟的 11m 低地板客车为基础车，采用康明斯公司的 4 缸柴油发动机和开关磁阻电动机作驱动，以镍氢电池为能源，最高车速达 72km/h，其各阶段配置见表 1.8-9。

表 1.8-7 EQ7200HEV 混合动力轿车整车配置					
车 型 配 置	基础车	功能样车	性能 样车 1	性能 样车 2	产品样车
发动机	2.0L/107kW	1.4L/55kW	1.6L/78kW		
变速器	4 挡 AT	4 挡 AMT			
蓄电池	—	280×1.2V-8Ah 镍氢			270×1.2V-8Ah 镍氢
电动机	—	28kW/14kW 交流感应	21kW/14kW 永磁同步		28kW/20kW 永磁（磁阻）同步
集成启动	—	3kW	3kW/7kW		3kW/10kW
发电机		交流感应	永磁同步		永磁（磁阻）同步

表 1.8-8 EQ7200HEV 混合动力轿车性能指标

参 数 \ 车 型	基础车	功能样车	性能样车 1	性能样车 2	产品样车
总质量 (kg)	1645	1720	1785	1740	1740
整备质量 (kg)	1320	1405	1460	1415	1400
最大车速 (km/h)	179.9	160.8	164.0	161.2	162.5
0 加速至 100km/h 所需时间 (s)	13.2	27.0	15.6	13.5	13.3
最大爬坡度 (%)	30	10	30	30	30
续航里程 (km)	500	620	—	760	875
整车排放标准	欧 II	—	欧 III	欧 III	欧 III
城市工况百公里油耗 (L)	12.2	9.7	7.2	7.3	6.85

表 1.8-9 EQ6110 混合动力公交车配置

配 置 \ 车 型	基础车 1	基础车 1	功能样车	性能样车	产品样车
发动机	8.268L/162kW	5.9L/162kW		3.9L/110kW	
变速器	5 挡 MT	5 挡 MT	6 挡 AMT	6 挡 AMT, 6 挡 MT, 5 挡 MT	
蓄电池	—	—	336V 80Ah 镍氢	336V 40Ah 镍氢	
电动机	—	—	100k 开关磁阻	60kW 开关磁阻	

第一汽车集团也试制了具有双轴并联结构形式的 11m 解放牌混合动力客车, 实现了电起车、纯电动、混合动力、怠速停机、再生制动等多种工作模式。采用电动机主动同步换挡技术, 改善了机械式自动变速器的换挡平顺性。两辆样车已投入长春市公交线路示范运行, 单车累计运行超过 2 万 km, 百公里平均油耗低于 30L, 整车配置见表 1.8-10。

表 1.8-10 解放牌混合动力城市公交车整车配置

参 数		解放牌混合动力客车
整 车	最高车速 (km/h)	80
	额定载质量 (kg)	4210
发 动 机	形 式	直列四缸增压中冷电控柴油机
	排量 (mL)	4764
	最低燃油消耗率 [g/(kW·h)]	205
	额定功率(kW)	140
	额定转速(r/min)	2300
	最大转矩(N·m)	700
	最大转速(r/min)	1400
镍氢动力 蓄 电 池	模组电池电压(V)	12
	模组电池容量(A·h)	27
电 动 机	电压(V)	336
	额定功率(kW)	40
	额定转矩(N·m)	106

第一汽车集团研制的红旗牌混合动力轿车经性能测试, 在 10.15 城市循环工况下百公里油耗为 6.5L, 排放达到国

III 标准, 主要技术参数见表 1.8-11。

表 1.8-11 红旗牌混合动力轿车主要技术参数

项 目	技术参数
最大车速(km/h)	≥160
0 加速到 100km/h 所需时间(s)	≤14
最大爬坡度 (%)	>25
续航里程(km)	≥500
蓄电池	镍氢

长安汽车(集团)有限责任公司和奇瑞汽车有限公司也各自试制了独具特点的混合动力电动汽车。长安汽车(集团)有限责任公司研制了集成起动发电机形式的混合动力轿车, 为并联式结构, 采用手动变速器和无级变速器两种机电耦合方案。整车整备质量为 1535kg, 最高车速为 160km/h, 最大爬坡度大于 35%, 车速从 0 到 100km/h 加速时间 14s, 油耗测试结果表明, 10.15 城市循环工况下油耗 9.8L/100km, 达到欧 III 排放标准。该车在国内首次进行了集成起动发电机形式的混合动力轿车碰撞试验, 高原、寒带和热带试验。车内采用 10kW 永磁磁阻环形电动机, 144V/6.5A·h 镍氢电池系统, 可实现制动能量回收。

奇瑞汽车有限公司开发出集成起动发电机形式的混合动力轿车动力总成, 同样采用并联式机电耦合方案, 完成了样机研制, 实现了混合动力功能。整车整备质量为 1300kg, 最高车速大于或等于 180km/h, 从 0 到 100km/h 加速时间小于或等于 12.8s, 最大爬坡度大于或等于 35%, 油耗测试结果表明, 10.15 城市循环工况下油耗为 6.3L/100km, 达到欧 IV 排放标准。目前发动机开发已经完成, 各项性能指标满足预定要求。同时, 奇瑞汽车有限公司还完成了两辆 BSG 混合动力轿车样车的研制, 实现了停车时自动停机、起步自动快速起动功能。

表 1.8-12 和表 1.8-13 为这些混合动力电动汽车采用的电动机，以及蓄电池的配置情况。

表 1.8-12 各承担单位研制的混合动力电动汽车电动机的配置情况

承担单位	车型名称	电动机类型	峰值功率 (kW)
东风电动汽车股份有限公司	混合动力轿车	永磁同步电动机	电动机: 28
		集成起动发电机 (ISG)	ISG: 7
	混合动力公交车	开关磁阻电动机	60
中国第一汽车集团公司	混合动力客车	交流感应电动机	80
	混合动力轿车	永磁-磁阻电动机	电动机: 25 ISG: 8
长安汽车 (集团) 有限责任公司	混合动力轿车	永磁同步电动机	15
奇瑞汽车有限公司	混合动力轿车	永磁同步电动机	15

表 1.8-13 各承担单位研制的混合动力电动汽车蓄电池的配置情况

承担单位	车型名称	蓄电池类型	额定电压 (V)	额定容量 (Ah)
东风电动汽车股份有限公司	混合动力轿车	镍氢动力电池	336	8
	混合动力公交车	镍氢动力电池	336	40
中国第一汽车集团公司	混合动力客车	镍氢动力电池	336	27
	混合动力轿车	镍氢动力电池	288	6.5
长安汽车 (集团) 有限责任公司	混合动力轿车	镍氢动力电池	144	6.5
奇瑞汽车有限公司	混合动力轿车	镍氢动力电池	12	7.5

4 燃料电池电动汽车

4.1 基本结构

燃料电池电动汽车的基本结构多种多样，按照驱动形式可分为纯燃料电池驱动和混合驱动两种；按照能量来源可分为车载纯氢和燃料重整两种方式。

纯燃料电池电动汽车只有燃料电池一个动力源，汽车的所有功率负荷都由燃料电池负担，其主要缺点有：① 燃料电池的功率大，成本昂贵；② 对燃料电池系统的动态性能和可靠性提出了很高的要求；③ 不能进行制动能量回收。

基于这些不利因素，目前的燃料电池汽车主要采用的是混合驱动形式，即在燃料电池的基础上增加了一组蓄电池或超级电容作为另一个动力源。

图 1.8-38 是采用“燃料电池+电池 (FC+B)”混合驱动型的燃料电池汽车的动力系统结构图。由于目前燃料电池系统自身的一些特殊要求，例如，在起动时空气压缩机或鼓风机需要供电，燃料电池电堆需要加热，氢气和空气需要加湿等，同时也为了能够回收制动能量，因而将蓄电池和燃料电池系统组合起来形成混合动力驱动系统。该系统降低了对燃料电池功率和动态特性的要求，同时也降低了燃料电池系

统的成本，但却增加了驱动系统的质量、体积和复杂性，从而增加了电池的维护、更换费用。

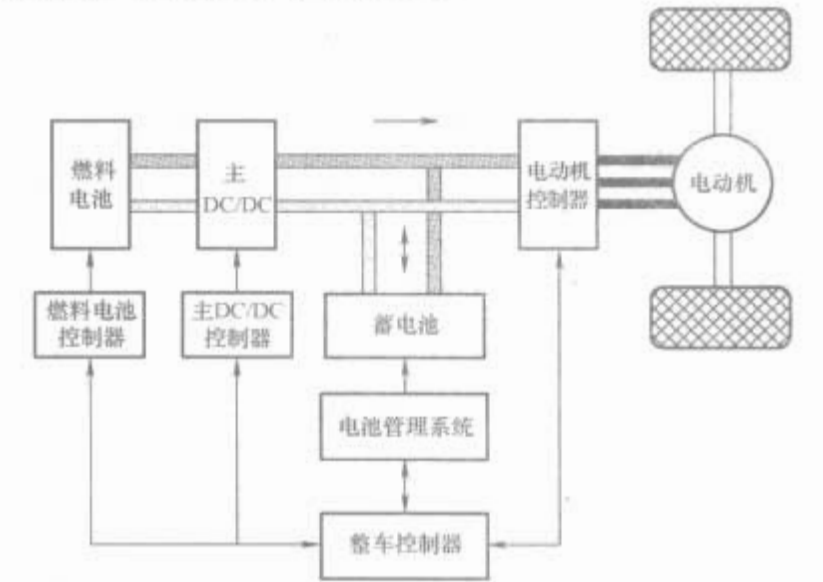


图 1.8-38 “FC+B”燃料电池电动汽车混合动力系统结构图

根据燃料电池所提供的功率占整车总需求功率比例的不同，燃料电池混合动力汽车可分为能量混合型和功率混合型两大类。

在燃料电池汽车开发的早期，燃料电池难以满足车辆的功率需求。在车辆行驶过程中，燃料电池只能提供整车功率需求的一部分，不足的部分还需要其他动力源，如蓄电池来提供，采用这种混合驱动形式的汽车即为能量混合型燃料电池汽车。能量混合型燃料电池汽车为了满足一定的性能指标，往往需要配备较大容量的电池组，从而导致整车的自重增加、动力性变差、布置空间紧张。能量混合型燃料电池汽车的燃料电池可以经常在系统效率较高的额定功率区域内工作；但每次运行结束后，除了要加注氢燃料外，还需要用地面电源为电池充电。随着燃料电池技术的不断成熟，燃料电池性能的逐渐提高，燃料电池所提供的功率比例越来越大，减少了电池的容量，从而减轻车重、提高动力性能等。但为了回收制动能量，还需要一定数量的电池，但电池只提供整车所需功率中的很小一部分。燃料电池作为主动力源，电池作为辅助动力源，车辆需要的功率主要由燃料电池提供，电池只是在燃料电池起动、汽车爬坡和加速时提供功率，在汽车制动时回收制动能量。采用这种混合驱动形式的汽车即为功率混合型燃料电池汽车。

由于镍氢电池或锂离子电池比能量及比功率较高，从而可以减少电池组的体积和重量，所以现在越来越多地被用作燃料电池混合动力电动汽车的电池。但是，由于目前这些电池的价格仍非常昂贵，同时使用过程中电池的工作电压、电流、温度等的变化与其安全有很密切的关系，所以往往需要配备专门的电池管理系统。

目前，燃料电池混合动力汽车的驱动形式多种多样，除了前面介绍的“FC+B”外，近年来，功率混合型燃料电池汽车开始出现“FC+C”的驱动形式，即采用燃料电池与超级电容组合，完全摒弃了寿命短、成本高、使用要求复杂的电池。超级电容的突出优点是寿命长和效率高，可大大降低使用成本，有利于燃料电池汽车的商业化推广和应用。图 1.8-39 所示为采用“燃料电池+电池+超级电容” (FC+B+C) 驱动形式的燃料电池汽车的系统结构，该形式是在电压总线上再并联一组超级电容用于提供（吸收）加速（紧急制动）的尖峰电流，从而减轻电池的负担，延长其使用寿命。

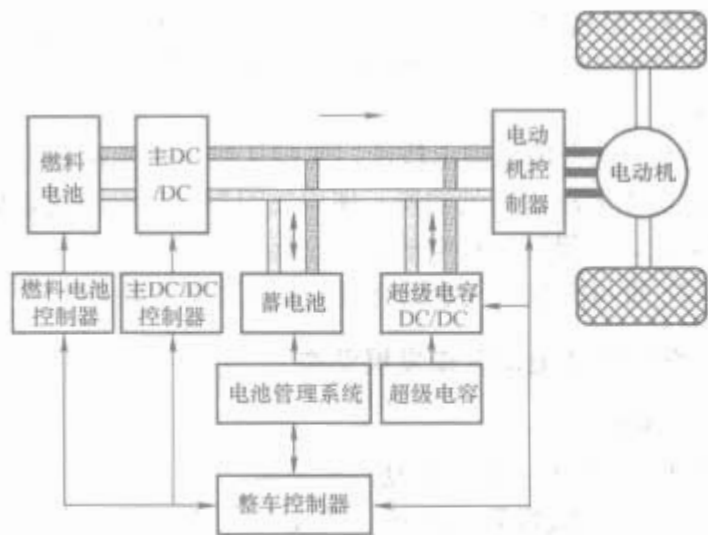


图 1.8-39 燃料电池电动汽车动力系统结构 (FC+B+C)

4.2 燃料电池系统

单独的燃料电池电堆不能用于发电，它必须和燃料供给与循环系统、氧化剂供给系统、水/热管理系统、控制系统等组成燃料电池发电系统，才能对外输出功率。

4.2.1 基本结构

如图 1.8-40 所示，燃料供给与循环系统在提供燃料的同时循环回收阳极排气中未反应的燃料。以纯氢为燃料的电池技术目前最成熟，而且系统结构相对简单，仅由氢源、稳压阀和循环回路组成。

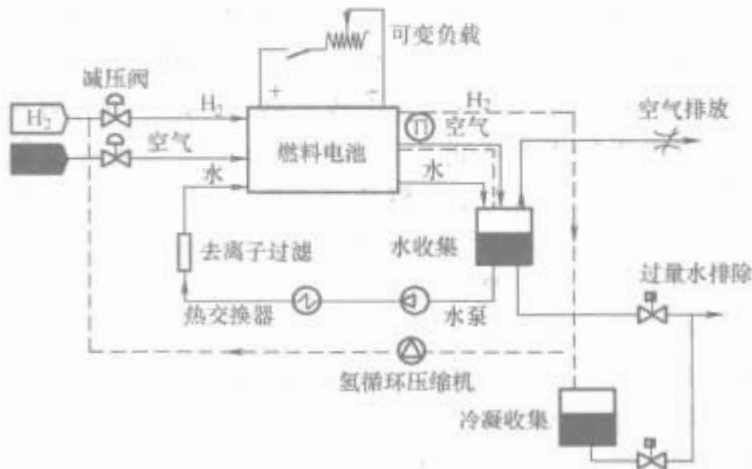


图 1.8-40 典型的质子交换膜燃料电池系统图

燃料电池的功率密度随反应物压力的升高而增大，所以，目前有些燃料电池采用提高空气供给压力的方法来提高燃料电池系统的功率密度。但是空气在被加湿的情况下，由于水蒸气的存在，所以将减小氧气的分压，而且空气中大量的非反应物，如氮气会同时被加压，如果没有从燃料电池排出的空气中回收能量的良好措施，则会大大降低净输出功率和系统效率，其作用将受到限制。这种空气加压系统的另一个问题是不能提供较大的过量空气供给，因为过量空气供给越大，系统效率越低，而大量的过量空气有助于改善燃料电池的性能。如果采用常压空气作为氧化剂，通过对膜加湿（取消对空气加湿、加压），加大过量空气供给，以及采用先进的冷却方法等一系列措施，则可以简化结构，提高效率。还有一类燃料电池采用变压系统，即根据燃料电池的负荷来调节系统中空气和氢气的压力，但是结构比较复杂。

电池内部的水/热管理是燃料电池的难点和重点，也是电池性能好坏的关键。如图 1.8-40 所示，产物水首先通过燃料电池电堆的反应区冷却燃料电池电堆本身，在冷却过程

中，水蒸气被加热至燃料电池的工作温度，被加热的水再与反应气体接触，起到增湿的效果。除了在增湿过程中部分热量被反应气体带走外，还需要一个水/空气热交换器，将多余的热量带走，防止系统热量积累，造成电池温度过高。控制系统根据负载对燃料电池功率的需求，或随燃料电池工作条件（压力、温度、电压等）的变化对反应气体的流量、压力、水/热循环系统的水流速等进行综合控制，保证电池正常有效地工作。

该控制系统由多种不同功能的传感器、阀件、泵、调节控制装置、管路、控制单元等组成。随着燃料电池电堆技术的日益成熟，控制系统成为决定燃料电池系统性能和制造成本的瓶颈。

燃料电池的主要研究热点包括：使用轻质材料，优化设计，提高燃料电池系统的比功率；提高燃料电池系统快速冷启动能力和动态响应性能；研究具有负荷跟随功能的燃料处理器；对蓄电池和超级电容、氢气存储进行系统优化设计，提高系统的效率和调峰能力，回收制动能量等。

4.2.2 DC/DC 变换器

一般来说，燃料电池输出电压比电动汽车动力总线电压略低，且特性较软。当输出电流增加时，输出电压下降幅度较大。为了实现燃料电池输出电压与汽车动力总线电压匹配，就需要 DC/DC（直流/直流）变换器。从控制的角度来说，为了控制燃料电池的能量输出，也需要一个 DC/DC 装置。

4.2.2.1 DC/DC 变换器的作用

燃料电池电动汽车的动力系统通常采用燃料电池+蓄电池（如锂离子电池、镍氢电池等）的混合结构。燃料电池的输出电压通常比较低，一般在 240~430V，而且燃料电池的外特性（电压随电流的变化特性）曲线斜率较大，电池的充放电特性及其使用安全性也要求电池的端电压在较小的范围内变化。当输出电流变化时，输出电压波动较大。另一方面，较高的动力总线电压等级可以提高驱动系统的效率和减小驱动系统的体积及重量。电池组的标称电压一般设计在 380V 以上。因此，燃料电池难以直接与蓄电池并联使用。解决这一问题的办法是在燃料电池的输出端串联一个 DC/DC 变换器，与蓄电池电压相匹配。同时，DC/DC 变换器可以对燃料电池的最大输出电流和功率进行控制，起到保护燃料电池系统的目的。

4.2.2.2 DC/DC 变换器的基本工作原理

升压变换的 DC/DC 变换器一般有两种结构：Boost 型和全桥逆变型。

(1) Boost 型变换器。Boost 型变换器工作原理如图 1.8-41 所示，由开关管 VT1、二极管 VD1、储能电感 L_1 输出滤波电容 C_1 组成。当 VT1 导通时，能量从输入端流入，并储存在 L_1 中，由于导通期间 VT1 正向饱和管压降很小，二极管 VD1 反偏，变换器输出由滤波电容 C_1 提供能量。当 VT1 截止时，电感 L_1 中的电流不能突变，它所产生的感应电势阻止电流减小，感应电势的极性为左正右负，二极管 VD1 导

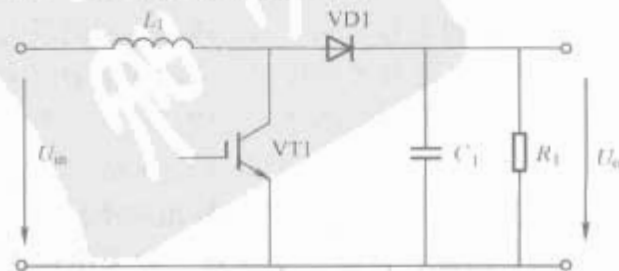


图 1.8-41 Boost 型变换器电路原理图

通,电感储能经二极管 VD1 流入电容 C_1 ,并供给输出端。如果开关管 V1 周期性地导通和截止,开关周期为 T ,导通时间为 t_{on} ,截止时间为 $T-t_{on}$,则输出电压 U_o 与输入电压 U_{in} 的关系为

$$U_o=U_{in}\frac{T}{T-t_{on}} \tag{1.8-50}$$

因此,当开关周期 T 不变,改变导通时间 t_{on} 时,就能获得升高的电压值。

开关管 V1 的饱和导通压降只有 2~3V,在 V1 截止期间,二极管 VD1 的压降在 1V 左右。因此,Boost 型变换器的效率可以达到 90%以上;而且其电路结构简单、器件少,作为车载变换器还具有重量轻、体积小等优点。

(2) 全桥逆变型变换器。全桥逆变型变换器的电路原理如图 1.8-42 所示,它主要由开关管 V1~V4、中频升压变压器 TR 和输出整流二极管 VD1、VD2 组成。开关管 V1~V4 构成全桥逆变电路,需要两组相位相反的驱动脉冲进行控制:当 V1 和 V4 同时导通、V2 和 V3 同时截止时,输入电压 U_{in} 通过 V1 和 V4 加到中频变压器 TR 的原边线圈上,原边电压 $U_{TR}=U_{in}$;当 V1 和 V4 同时截止, V2 和 V3 同时导通时,输入电压通过 V2 和 V3 反方向地加到中频变压器 TR 的原边线圈上,原边电压 $U_{TR}=-U_{in}$;当开关管 V1~V4 同时截止时, $U_{TR}=0$ 。这样,通过开关管 V1~V4 的交替导通和截止,将输入的直流电压转换成交流电压加到变压器上,副边电压通过 VD1 和 VD2 整流,输出直流电压。如果开关管 V1~V4 开关周期为 $2T$,其中,导通时间为 t_{on} ,变压器副、原边线圈变比为 n ,则全桥逆变式变换器输出电压 U_o 和输入电压 U_{in} 之间的关系为

$$U_o=U_{in}n\frac{t_{on}}{T} \tag{1.8-51}$$

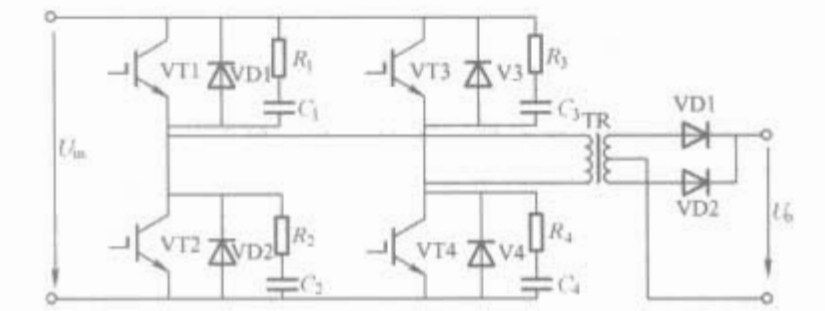


图 1.8-42 全桥逆变型变换器电路原理图

当采用升压变压器时, $n>1$,可获得变换器的升压特性;当开关周期 T 不变,改变导通时间 t_{on} 时,就能调节输出的电压值。

与 Boost 电路相比,全桥逆变型变换器的输入和输出是通过中频变压器隔离的,由于变压器具有一定的频率响应带宽,在变换器输入端和变压器原边电路产生的部分高频干扰信号不能传输到变换器的输出端,因此,作为车载变换器,全桥逆变型结构具有较好的电磁兼容性能。

在燃料电池电动汽车中,除了上述两种升压变换器外,还有对超级电容进行充放电控制的双向 DC/DC 变换器,它位于电压总线和超级电容之间。当总线电压对超级电容进行充电时,它起到降压变换器的作用;当超级电容对电压总线释放能量时,它起到升压变换器的作用。此外,车上还有对直流 24V 低电压电池进行充电的降压变换器。由于电压变比大(输入为 384V、输出为 26V)、输出功率较小(一般只需要 5~6kW),因此,该降压变换器一般采用推挽式或半桥式的电路结构形式。

4.2.2.3 燃料电池电动汽车 DC/DC 变换器的关键技术

燃料电池电动汽车 DC/DC 变换器的关键技术可概括为:

- (1) 设计合理的输出特性,实现从燃料电池输出电压到蓄电池工作电压之间的变换,还应该限制燃料电池的输出功率和电流,以保证燃料电池的安全运行。
- (2) 要与车载电气系统有良好的电磁兼容性。

4.3 燃料电池电动汽车发展动态

4.3.1 美国

4.3.1.1 戴姆勒—克莱斯勒汽车公司

1994 年,戴姆勒—奔驰公司发布了燃料电池电动汽车的原型车 NECAR I。该车装备了 300at ($1at=9.8\times 10^4Pa$) 的压缩氢气罐和 50kW 的燃料电池,燃料电池系统的电压为 230V。一次加满压缩氢气后,它的续驶里程能达到 100km。

1996 年,戴姆勒—奔驰公司发布了 NECAR II,它比 NECAR I 体积稍小。氢气罐压力为 250at,放置在车顶。安装在汽车后部地板上的燃料电池电堆与 NECAR I 功率相同,但体积稍小,因此功率密度得到了大幅提高。NECAR II 的速度更快,达到 110km/h,续驶里程延长到了 250km。

1997 年,戴姆勒—奔驰公司发布了具有相同技术的公共客车 NEBUS。300at 的氢气罐放置在车顶前半部分,250kW 的燃料电池放置在汽车后半部分的顶部及地板下,系统车重比功率改善为 5.6kg/kW,燃料电池系统的输出功率密度也改善为 15kg/kW。同年,戴姆勒—奔驰公司又发布了 NECAR III 号燃料电池电动汽车,它是通过将该公司 A 级轿车的汽车夹板层内安装甲醇改质器,并由甲醇分解获取的氢气来提供给燃料电池而发电的。这一技术去掉了氢气罐,减轻了车重,提高了车辆的可用性。NECAR III 车的最高车速达到 120km/h,续驶里程达到了 400km。

1999 年,克莱斯勒公司发布了 Jeep Commander 燃料电池概念车。该车可以通过从加油站得到汽油,经改质器分解出氢气并供给燃料电池而获得电能。但是汽油分解出氢气的过程比甲醇分解复杂,CO₂ 的排放量也增加了。2000 年,克莱斯勒公司又制造了采用甲醇改质方式的燃料电池与充电电池混合的燃料电池电动汽车 Jeep Commander 2,该车的燃油经济性换算成汽油为 5.1km/L,续驶里程可达 190km。

1999 年,戴姆勒—奔驰公司同时发布了 NECAR IV。在这一方案中,燃料电池使用的是液态氢,不需要改质器,燃料电池的功率为 70kW,质量比功率变为 5kg/kW。燃料电池系统的质量比 NECAR III 的 750kg 小一半以上。另一方面,输出功率增加了 40%,基本接近汽油发动机的水平,车速从 0 到 50km/h 加速时间为 6.0s,与 A 级 44kW 燃油汽车相当;车速从 0 到 100 km/h 加速时间为 26.3s,比燃油汽车的 18.0s 长一些。电动机的功率为 55kW,燃料电池输出的多余功率可以为照明灯、空调提供电力。

2000 年 11 月,戴姆勒—奔驰公司发布了对 NECAR III 的改良型 NECAR V。该车的整套动力系统结构紧凑,体积比 NECAR III 减小了一半,功率却提高了 50%,仅用一个燃料电池电堆就能产生 75kW 的电能,其最高车速超过 150km/h。

4.3.1.2 通用汽车公司

1966 年,通用汽车公司推出世界上第一个可驾驶的燃料电池示范车 Electrovan。该车使用液态氢作为燃料,纯氧作为氧化剂,续驶里程为 240km,最高车速达到 112km/h。

1998年,通用公司发布了由EV1电动汽车改装的燃料电池电动汽车EV1,续驶里程达到483km,车速从0到100km/h加速时间为9s,最高车速达到129km/h。

2000年初,通用汽车公司发布了Precept燃料电池概念轿车,驱动形式有混合驱动和纯燃料电池两种。Precept为四轮驱动,燃料电池的电驱动前桥的电动机,实际运行数据显示,Precept轿车的等效燃油经济性能达到45.9km/L。

2000年2月末,通用汽车公司再次发布了Hydrogen 1燃料电池电动汽车。它是利用一款“欧宝”轿车的平台开发的,采用液态氢为燃料。燃料电池电堆包括200个串联的单体,总电压为125~200V,输出功率为80kW,最大功率为120kW。电动机采用三相交流感应电动机,工作电压范围为250~380V,功率输出为55~60kW,转矩为251~305N·m。电动机上装有一个单级减速器,采用前轮驱动。该车还搭配了用于短时间峰值功率输出的蓄电池。车辆的整备质量为1575kg,车速从0到100km/h加速时间为16s,最高车速为140km/h,一次加氢续驶里程为400km。

2002年,通用汽车公司推出燃料电池概念车Autonomy,它是第一款从零开始全新设计,使用燃料电池驱动系统的车型,并采用了先进的线控电子控制技术。Autonomy的燃料电池组可以灵活组合,改善了汽车的载客空间和载货能力。Autonomy中所有的关键系统,包括燃料电池组和车载氢燃料存储系统,都安装在底盘上。车身和底盘可以分开制造,降低了燃料电池系统的成本。

2002年9月,通用汽车公司又发布了可以驾驶的、采用线控技术的燃料电池电动汽车Hy-wire,其原型就是Autonomy。Hy-wire的主要技术参数见表1.8-14。

项 目	技术参数
底盘尺寸 (长×宽×高, mm×mm×mm)	4300×1670×280
整车总质量 (kg)	1898
最高车速 (km/h)	160
燃料电池功率 (kW)	94 (连续), 129 (峰值)
燃料电池电堆电压 (V)	125~200

Sequel是继Autonomy和Hy-Wire概念车之后,通用汽车公司研发的第三代氢动力燃料电池电动汽车,车身质量为2165kg。Sequel上的燃料电池系统功率比Hy-Wire增大了20%,可使Sequel在10s之内从0加速到100km/h,续驶里程可达480km。燃料电池电堆、空气和氢气子系统、冷却系统和高压配电系统组成的燃料电池功率模块,可以对牵引电动机及空调、线控电子装置、电池等辅助系统供应73kW的功率。燃料电池空气进气系统更安静、重量更轻。Sequel配置3个驱动电动机,总功率为110kW,构成前后两个驱动系统,前系统由一个横置的60kW西门子电动机、电子功率控制装置和行星齿轮传动装置组成,车轮上可以获得2053N·m的转矩,后部系统由两个通用汽车公司自己设计的25kW电动机、功率逆变器组成,每个电动机可以输出500N·m的转矩,总驱动转矩可达3398N·m。此外,车上还配备有Saft公司的65kW锂离子电池,用来在车辆加速时提供额外的功率和存储车辆制动再生能量,延长车辆总行驶里程。

4.3.1.3 福特汽车公司

1998年,福特汽车公司发布了装备压缩氢气和巴拉德

公司制造的燃料电池Mark700的P2000HFC燃料电池电动汽车。该车车身质量为1514kg,采用三相交流感应电动机(最大输出功率为67kW,最大输出转矩为190N·m,最高效率为91%)作驱动,减速器的减速比为10:1。车辆后背部装有3个25kW的燃料电池,最高等效燃油经济性为33.6km/L,车速从0到100km/h加速时间为12.3s,最高车速为128km/h,续驶里程约为160km。

2000年1月,福特汽车公司发布了在Ford Focus上搭载燃料电池的Th!nk FC5燃料电池电动汽车。该车带有甲醇改质器,燃料电池为加拿大巴拉德公司制造的Mark900(75kW/90kg、1.3kW/L),氢气罐采用350at,容积为86L,续驶里程增大到250km,车速从0到100km/h的加速时间小于14s。

4.3.2 日本

4.3.2.1 丰田汽车公司

1996年,丰田汽车公司展示了采用储氢合金方式储氢的燃料电池+镍氢电池的电动汽车FCHV-1,最高车速为100km/h,续驶里程为250km。

1997年,丰田汽车公司又展示了其第一辆采用车载甲醇重整制氢的燃料电池加镍氢电池的电动汽车FCHV-2,最高车速达到125km/h,续驶里程达到500km。

2001年2月,丰田汽车公司推出FCHV-3燃料电池电动汽车。FCHV-3是以Highlander运动型多功能车为原型,采用“燃料电池+蓄电池”的混合驱动形式。燃料电池采用丰田汽车公司开发的90kW燃料电池,蓄电池采用镍氢电池,合金方式储氢。FCHV-3的最高车速达到150km/h,续驶里程达到300km以上。

2001年6月,丰田汽车公司宣布FCHV-4燃料电池电动汽车研制成功。FCHV-4是以Kluger-V SUV为原型开发的,使用纯氢为燃料的混合驱动型燃料电池电动汽车。FCHV-4采用高压储氢瓶方式储氢,共采用了4个高压气瓶。每只容积为34L,储氢压力为250at,被布置在车辆底盘下。与使用储氢合金相比,整个储氢系统质量减小了200kg,只有100kg左右。燃料电池仍采用丰田汽车公司独立开发的90kW燃料电池,蓄电池采用镍氢电池,驱动电动机采用80kW永磁同步电动机,一次充氢可以行驶250km以上的距离。该车采用热泵式空调系统,用CO₂作制冷剂,实现了无氟化。

2001年10月,丰田汽车公司展示了FCHV-5燃料电池电动汽车。该车的主要特点是采用车载清洁碳氢燃料CHF重整方法制氢。CHF不仅含硫量低,而且燃料来源广泛,可以从石油、天然气、煤炭等多种原料中提取。另外,使用汽油的汽车也可以使用CHF,还可以使用现有的加油站设施。FCHV-5使用的燃料电池、电动机等主要零部件同FCHV-4一样。车载的CHF重整器通过改进催化剂、热交换器等,可以提供更高质量的氢。

2001年,丰田汽车公司公布了与日野汽车公司共同研制的燃料电池公交车FCHV-BUS 1,该车采用低地板设计,燃料采用高压氢气,动力系统采用“燃料电池+蓄电池”的混合动力系统。燃料电池功率为90kW,可载客63人。2002年,丰田汽车公司对FCHV-BUS 1进行了多项改进,在此基础上开发出燃料电池公交车FCHV-BUS 2。该车的主要特点是燃料电池由FCHV-BUS 1的一个增加到两个,燃料电池的输出功率增加到180kW。驱动系统采用双电动机驱动方式。FCH-BUS 2的主要技术参数见表1.8-15。

表 1.8-15 FCHV-BUS2 的主要技术参数

项 目	技术参数
外形尺寸 (长×宽×高, mm×mm×mm)	1015×2490×3360
乘客人数 (人)	60
最高车速 (km/h)	80
一次充氢续驶里程 (km)	250
燃料电池	丰田 90kW×2
驱动电机	永磁同步电机 80kW×2
储氢方式	高压储氢, 最高压力为 35MPa
镍氢电池	4×6.5A·h×40 (288V, 4 组并联)

4.3.2.2 本田汽车公司

本田汽车公司于 1999 年 9 月发布了其燃料电池原型车 FCX-V1 和 FCX-V2。FCX-V1 采用纯氢作为燃料, 金属合金储氢方式。60kW 的燃料电池电堆由加拿大巴拉德公司提供。FCX-V2 采用车载甲醇重整制氢工作方式, 本田汽车公司自己开发了燃料电池。这两种车型都以本田汽车公司的 EV Plus 为原型改造而成, 只能乘坐两人, 采用“燃料电池+蓄电池”混合驱动方式。

2000 年 9 月, 本田汽车公司推出了经过改进的燃料电池原型车 FCX-V3, 实现了中央集成控制, 其主要关键部件的设计和整车布置更加紧凑, 可以乘坐 4 名乘客。FCX-V3 采用独特的“燃料电池+超级电容”的混合驱动方案, 燃料电池选用巴拉德公司的燃料电池电堆, 堆功率为 62kW。储氢方式采用 100L 高压储氢瓶方式, 储氢压力为 25MPa, 氢气燃料填充时间为 5min。

2001 年 9 月, 本田汽车公司宣布燃料电池汽车 FCX-V4 开发研制成功。该公司对 FCX-V4 的各主要部件进行了全面的改进, 各种性能已经接近大批量生产的传统汽车, 并采取了碰撞安全保护措施。燃料电池采用巴拉德公司的燃料电池电堆, 输出功率为 78kW。储氢瓶容积增加到 130L, 压力为 35MPa, 一次加氢可以行驶约 300km, 最高车速可达 140km/h。

2002 年秋季, 本田汽车公司展示了商品燃料电池汽车 FCX。该车是在本田 FCX-V4 的基础上改进而成的。FCX 商品车与其前身 FCX-V4 的主要区别是车身全长缩短 40mm, 配备了显示燃料电池发电状态及电容器充放电状态、可行驶距离和行驶车速的“三眼式”仪表盘, 但主要构件和布局基本与 FCX-V4 一样。表 1.8-16 列出了 FCX 的技术参数。

表 1.8-16 FCX 燃料电池电动汽车的技术参数

项 目		技术参数
乘客数（人）		4
最高车速（km/h）		150
驱动电机	最大功率（kW）	60
	最大转矩（N·m）	272
	形 式	永磁同步电动机
燃料电池电堆	形 式	质子交换膜（巴拉德公司）
	输出功率（kW）	78
燃 料	储能方式	高压氢气
	压力（MPa）	35
	容积（L）	156.6

续表

项 目	技术参数
外形尺寸 (长×宽×高, mm×mm×mm)	4165×1760×1645
辅助储能装置	超级电容
一次加氢续驶里程 (km)	355

4.3.3 中国

1999 年, 北京世纪富原公司与清华大学联合研制成功一辆由 5kW 燃料电池驱动的观光车。2001 年, 由中国科学院大连化学物理研究所、中国科学院电工所、东风汽车工程研究院等单位联合研制的 30kW 质子交换膜燃料电池中型客车通过了测试, 该车最大车速可达 60km/h。

在“十五”863 计划电动汽车重大专项的支持下, 上海燃料电池动力系统有限公司联合同济大学、上海汽车集团等单位成功开发出拥有我国自主知识产权的“超越一号”、“超越二号”和“超越三号”三代燃料电池动力系统平台和试验样车, 采用了“燃料电池+蓄电池”混合动力系统、动力总成分布式控制、动力系统故障诊断、功率控制集成、整车轻量化等多项核心技术。

“超越一号”以桑塔纳 2000 型轿车车身为基础, 利用蓄电池的能量缓冲特性, 使燃料电池发动机处于高效、稳定、可靠的最佳工作状态, 测试结果显示, “超越一号”的最高车速为 105.8km/h, 最大爬坡度为 26%, 续驶里程为 231km, 从 0 到 80km/h 加速时间 15.4s。

在“超越二号”的设计中, 注重了轻量化和可靠性研究。电动机及控制器集成一体, 与高压 DC/DC 变换器集中水冷, 并全部采用 CAN 总线控制。测试结果显示, “超越二号”的最高车速为 115.3km/h, 最大爬坡度为 20%, 续驶里程为 197km, 从 0 到 100km/h 加速时间 26.72s。从实测指标来看, 总体性能与国外大公司参赛车辆性能相当, 部分指标优于其他车辆。

“超越三号”燃料电池轿车系列共有三个车型, 实现了结构设计轻量化、动力系统模块化、功率控制单元化、水冷系统集中化、辅助系统电动化等创新技术, 在系统工作的高效率、可靠性、耐久性、安全性等方面有了很大提高。最高车速为 122km/h, 爬坡度大于 20%, 从 0 到 100km/h 加速时间 19.5s, 10.15 城市循环工况续驶里程 230km。表 1.8-17 显示了“超越”系列燃料电池电动汽车的各阶段的性能指标。

表 1.8-17 “超越”系列燃料电池电动汽车的各阶段的性能指标

技术指标	超越一号	超越二号	超越三号
最高车速 (km/h)	105.8	115.3	122
从 0 到 100km/h 加速时间 (s)	36.6	26.72	19.5
爬坡度 (%)	26	>20	>20
续驶里程 (km)	231	217	230
百公里氢耗量 (kg)	1.394	1.032	1.132

同样, 在电动汽车重大专项的支持下, 清华大学联合北京客车总厂等单位研制出三辆 BK6110FCHEV 型燃料电池城市客车示范车和两辆 BF6120FCHEV 型燃料电池城市客车目标车。目标车最高车速为 85km/h, 百公里氢燃料消耗 4.26kg (40km/h 等速行驶条件)。所采用的核心技术包括: 开发出了独具特色的能量混合型和功率混合型两种燃料电池

混合动力系统，并已成为国际上的主流系统构型；在混合动力控制方面，创造了整套知识产权；在燃料电池系统测试评价、氢系统与氢电安全及底盘电动化技术方面也取得了系列化核心技术。

三辆示范车共进行了 25000km 道路试验，单车最大考核里程为 13000km，最大日考核里程超过 500km。经过三个阶段的研发，整车性能和可靠性有了很大地改进和明显地提高，尤其是作为能量混合动力系统构型符合示范运行车的技术要求，初步具备了产业化和批量化的条件。

燃料电池城市客车及燃料电池发动机的主要性能指标不断提高，见表 1.8-18。表 1.8-19 为燃料电池目标样车整车主要技术参数。

表 1.8-18 燃料电池城市客车及燃料电池发动机的主要性能指标阶段变化

技术指标	第一阶段	第二阶段	第三阶段
最高车速 (km/h)	65	69.5	85
加速时间 (s, 从 0 到 50km/h)	—	24.5	25.5
最大爬坡度 (%)	—	>16.5	>20
续驶里程 (km)	—	278	448
平均故障间隔里程 (km)	—	100	>1000
40km/h 百公里氢耗量 (kg)	—	5.18	4.26
发动机最大功率 (kW)	60	72	130
发动机标定功率 (kW)	50	60	100
标定工况发动机燃料有效效率	41	48	52
标定工况发动机质量比功率 (W/kg)	85	103	127
发动机最大质量比功率 (W/kg)	102	124	170

表 1.8-19 燃料电池目标样车整车主要技术参数

参数类别	参数名称	数 量
外形尺寸	总长×总宽×总高 (mm×mm×mm)	12000×2550×3350
	轴距 (mm)	5980
	前悬 (mm)	2650
	后悬 (mm)	3370
结构特点	车 身	全承载式格栅结构车身，预应力蒙皮，玻璃缸成型件，铝合金舱门
	前桥型号	ZF RL85A 型超低地板客车专用
	前桥额定轴荷 (kg)	8500
	后桥型号	ZF AV132/90° 型超低地板客车专用
	后桥额定轴荷 (kg)	11000
	主减速比	6.2
	车轮滚动半径 (m)	0.475
	前后悬架形式	弹性空气悬挂、双向作用液压桶式减震器，前悬架带横向稳定装置
	制动器形式	双回路盘式气制动系统，带 ABS/ASR 功能
	转 向	ZF8098 循环球伺服液压动力转向器
质量参数	地板离地面高度 (mm)	350
	整车整备质量 (kg)	12600
	整车满载质量 (kg)	17000
	厂定人数 (人)	65

在燃料电池发动机开发方面，上海神力公司研制出了第一代乘用车用燃料电池发动机，并已安装在“超越一号”上，通过了各种实际路况的测试，第二代乘用车燃料电池发动机安装在了“超越二号”车上，发动机净输出功率达到 32kW。

中国科学院大连化学物理研究所研制的用于城市大客车的 50kW 燃料电池发动机，氢气利用率达到为 97%，电池组发电效率为 57%，整个发动机的效率大于 42%。该所研制的第二代 60kW 质子交换膜燃料电池发动机在清华大学完成了 150h 的联合调试，装载该发动机的城市客车完成了 3000km 累计里程考核。该车的整车性能：额定输出功率为 60kW，燃料电池电堆最大输出功率为 94kW，最大净输出为 72kW，最高车速为 70km/h。

5 电动机驱动系统

电动机驱动系统是电动汽车的心脏，其功能框图如图 1.8-43 所示。它的任务是在驾驶员的控制下，高效率地将蓄电池的能量转化为车轮的动能，或者将车轮上的动能反馈到蓄电池中。从功能的角度看，电动汽车的电动机驱动系统可分为电气和机械两大系统。电气系统由电动机、功率转换器和电子控制器等三个子系统组成；而机械系统主要包括机械传动装置（是可选的）和车轮。电气和机械系统的边界形成电机的气隙，用来完成电动机能量的转换。电子控制器分为三个功能单元：传感器、中间连接电路和处理器。传感器把测得的数据，如电流、电压、温度、速度、转矩及电磁通等，转变为电信号，通过连接电路把这些电信号调整到合适的值，然后输入到处理器。处理器的输出信号通常经过中间电路放大，驱动功率转换器的半导体元件。在驱动和能量再生过程中，能量源与电动机之间的能量流动是通过功率转换器进行调节的。电动机与车轮可以通过机械传动装置连在一起，也可以将电动机直接装在车轮上，用电动轮直接驱动。

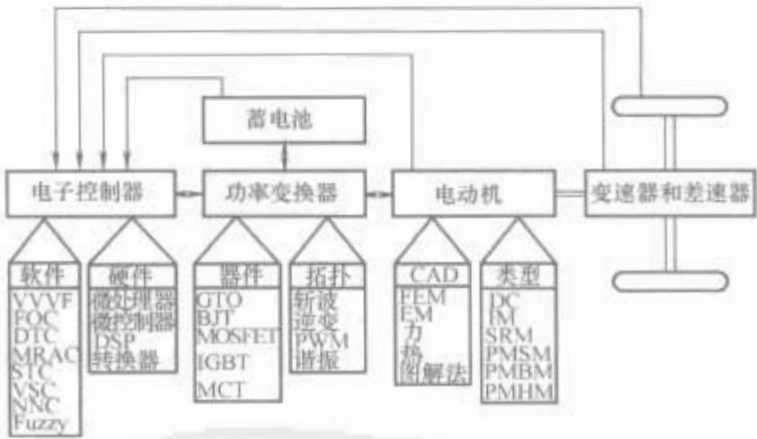


图 1.8-43 电动汽车的电动机驱动系统

5.1 电动汽车对驱动电动机的特性要求

不同于工业驱动电动机，电动汽车的驱动电动机通常要求能够频繁地起动/停车、加速/减速，低速或爬坡时要求高转矩，高速行驶时要求低转矩，并要求变速范围大。电动汽车对驱动电动机的要求可归纳如下：

- (1) 电动汽车驱动电动机需要有 4~5 倍的过载，以满足短时加速行驶和最大爬坡度的要求。
- (2) 电动汽车驱动电动机的最高转速要求达到在公路上巡航时基速的 4~5 倍。
- (3) 电动汽车驱动电动机应根据车型和驾驶员的驾驶习惯进行设计。
- (4) 电动汽车驱动电动机要求有高的功率密度，以及在

较宽的转速和转矩范围内都有较高的效率，从而能够减小车重，延长续驶里程。

(5) 为使多电动机协调运行，要求电动汽车驱动电动机可控性高、稳态精度高、动态性能好。

(6) 电动汽车驱动电动机往往被装在机动车上，空间小，工作在高温、恶劣天气及频繁振动等恶劣的工作条件下。

5.1.1 用于电动汽车的各种驱动电动机

适用于电力驱动的电动机可分为两大类，即有换向器电动机和无换向器电动机。前者表示它们通常有换向器组件，而后者则无换向器组件。图 1.8-44 中有阴影的电动机类型表示已经被近代电动汽车采用。表 1.8-20 显示了它们在电动汽车上的应用。

表 1.8-20 电动汽车电动机的应用

车 型	电动机
菲亚特 Panda Elettra	串励直流电动机
马自达 Bongo	并励直流电动机
Conceptor G-Van	他励直流电动机
铃木高级三轮车	永磁直流电动机
菲亚特 Seicento Elettra	感应电动机
福特 Th! nk City	感应电动机
通用 EV1	感应电动机
本田 EV Plus	永磁同步式电动机
日产 Altra	永磁同步式电动机
丰田 RAV4	永磁同步式电动机
Chloride Lucas	开关磁阻电动机

习惯上把有换向器的直流电动机称为直流电动机，由于技术成熟和控制简单，直流电动机一直在电力驱动领域有着突出的地位。实际上，串励、并励、他励和永磁等各种直流电动机目前在电动汽车上都有应用。

无换向器直流电动机在效率、功率密度、运行成本、可靠性及免维护方面优于传统的直流电动机，因此，目前无换向器的直流电动机在电动汽车应用中更受重视。

感应电动机在电动汽车驱动电动机领域里应用很广。传统的变频变压（VVVF）控制技术，由于动态模型的非线性，所以不能使感应电动机满足所要求的驱动性能。矢量控制（FOC）法控制感应电动机可以克服由其非线性带来的控制难度，但在轻载及有限的恒功率工作区域内运行时的效率较低。通过调节不同负载情况下电动机励磁电流的大小可将能耗降低大约 10%，并能增加大约 4% 的再生能量，使电动汽车的续驶里程增加 14% 以上。无速度传感器矢量控制可以提高控制的可靠性，降低制造成本及缩短电动机的轴向长度，是感应电动机控制方法研究的热点之一。感应电动机的直接转矩控制（DTC）手段直接、结构简单，非常适合电动

汽车的控制。但是，谐波分量和低速性能较差等问题亟待解决。电动汽车感应电动机的电极变换方案能有效地把恒功率的转速范围提高到基速的四倍以上，且不增大电动机的体积和电流。

永磁同步电动机实质上是同步电动机，能够不经电子转换就通过正弦交流电或脉宽调制方式使其运行。当永磁体嵌在转子表面时，永磁同步电动机的运行特性与非凸极同步电动机一样。如果把永磁体埋入转子的磁路中，凸极就会产生附加的磁阻转矩，从而使电动机的恒功率区域有更宽的转速范围。同步磁阻电动机利用了转子凸极，去掉了励磁绕组或永磁体，其结构简单，成本低廉，但输出功率相对较低。永磁同步电动机通常也采用矢量控制方法，以满足电动汽车电动机驱动的高性能要求。

永磁无刷直流电动机也称为永磁无刷方波电动机。这种电动机最明显的好处是去掉了电刷，从而也排除了由电刷引起的许多问题；另一个优点是它的方波电流和磁场是垂直的，能产生较大的转矩。与永磁同步电动机不同的是，永磁无刷直流电动机通常装有转轴位置传感器。

开关磁阻电动机结构简单，制造成本低廉，转矩/转速特性好，适合于电动汽车驱动。但是，由于电动机磁极端部的严重磁饱和以及磁极和沟槽的边缘效应，所以使其设计和控制非常困难和精细，噪声问题也很严重。采用模糊滑模控制法可以控制电动机的非线性，并使噪声达到最小。

5.1.2 功率电子器件

5.1.2.1 电动汽车用功率电子器件

在选用电力驱动的功率器件时，必须考虑以下几项要求：

- (1) 额定值。额定电压根据蓄电池的铭牌规定的电压、充电时的最大电压和再生制动时的最大电压确定，而电流的额定值取决于电动机额定功率的峰值及所并联的功率器件的个数，当这些器件并联时，其导通状态与开关特性必须匹配好。
- (2) 转换效率。开关频率较高，可减小滤波器的体积，并有利于满足电磁干扰限制的要求。当开关频率高于 20kHz 时，可避免出现噪声。
- (3) 功率损耗。导通时的压降或损失应降到最小，同时开关损耗应尽可能小。由于高的开关频率会增加开关损耗，开关频率在 10kHz 时可使能量密度、噪声及电磁干扰同时达到最优。漏电电流应限制在 1mA 以内，以使断开状态的损耗最小。
- (4) 基极/门极的可驱动性。器件应考虑到简单和安全的基极或门极驱动。相应的驱动信号或为触发电压/电流，或为线性电压/电流。电压驱动模式能耗非常低，通常被优先采用。
- (5) 动态特性。器件的动态特性应足够好，以允许有较高的 du/dt 和较高的 di/dt 能力，并容易进行并联。内部的续流二极管应该和外部的主器件具有相似的动态特性。

(6) 坚固。功率器件应该有足够的抗过载能力，以承受过电压时的巨大能量，并能在过流时通过快速熔断半导体熔断丝加以保护，它应不用或尽量少用缓冲电路。由于电动汽车频繁地加速、减速，功率器件会引起频繁的热循环冲击，它应在这种热压条件下可靠工作。

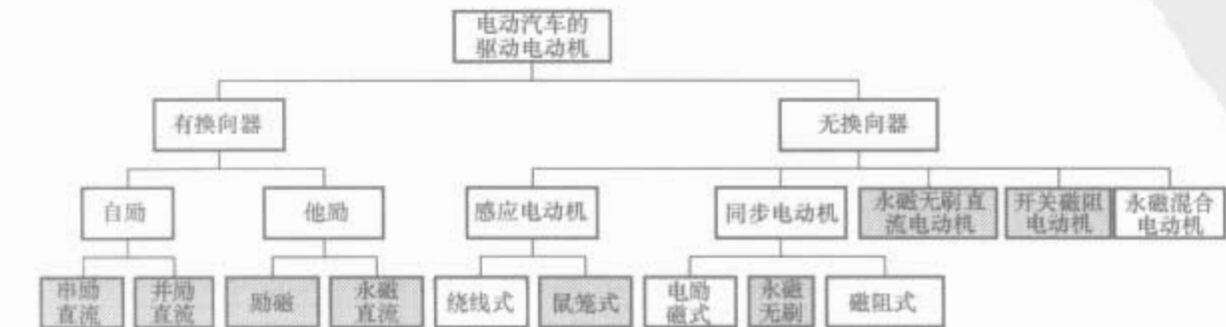


图 1.8-44 电动汽车驱动电动机的分类

(7) 成熟性与成本。功率器件应该尽量经济。

在功率器件中，MOSFET、IGBT 和 MCT 比较适用于电动汽车驱动系统。其中，IGBT 的性能最优，它在该领域的应用也最广；MOSFET 在那些功率相对低的电动三轮车和电动自行车上得到广泛使用。

5.1.2.2 电动汽车用功率转换器

DC/DC 变换器和 DC/AC(直流/交流)变换器可分别用于电动汽车驱动系统的直流和交流电动机。

直流变换器能在几十甚至几百千赫兹下工作，当用于电动汽车驱动时，两象限的直流斩波器最理想。它能把蓄电池的直流电压变换为可变的直流电压，并能在再生制动时进行能量的反向转换。四象限直流变换器可以用于直流电动机的可逆和再生速度控制。

DC/AC 变换器又称为逆变器，通常分为电压输入式和电流输入式。由于需要大量的电感元件来模拟电流源，所以电流供给式逆变器很少用于电动汽车驱动。电压输入式逆变器很简单，并且能进行双向能量转换，所以电动汽车上几乎只使用这种逆变器。典型的三相全桥电压输入式逆变器如图 1.8-45 所示。根据不同的需要，它的输出波形可以为方波、六步式或是脉宽调制波形。六步式波形由于幅值不能直接控制，而且谐波丰富，所以目前该波形已被淘汰。另外，脉宽调制波形谐波合适，其基本量和频率在转速控制时变化平缓。

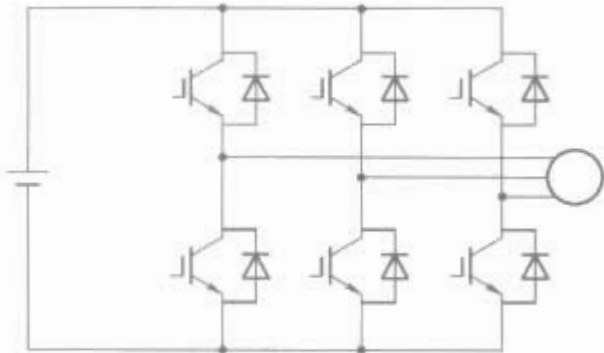


图 1.8-45 三相全桥电压式逆变器

人们开发出大量适合于电压供给式逆变器的 PWM 开关方案用于抑制谐波、更好的利用直流电压、直流电压波动的耐受，以及适合于实时与基于微控制器的实施。它们可分为电压控制与电流控制的 PWM。现阶段最先进的电压控制 PWM 方案包括：自然的或正弦 PWM、规则或统一的 PWM、消除谐波或最优的 PWM、三角形 PWM、无载波或随机的 PWM，以及等面积的 WM 等。对于高性能的电动机驱动，由于电动机的转矩和磁通与所控制的电流直接相关，所以电压输入式逆变器的电流控制的应用特别引人注目。电流控制 PWM 方案的技术发展现状有滞后带(hysteresis-band)或带一带(band-band)的 PWM，用电压对电流进行瞬时控制的 PWM，以及空间矢量 PWM 等。

5.1.2.3 电动汽车逆变器软开关技术

功率逆变器可用软开关来代替强制式开关。软开关运用谐振回路来形成电流或电压波形，使功率开关器件处于零电压或零电流状态。一般来说，软开关逆变器具有以下优点：

- (1) 由于处于零电压或零电流状态，功率器件的开关损失为零，因而效率也高。
- (2) 由于热消耗低，且无需缓冲，转换器的体积和重量都减少了，因而功率密度高。
- (3) 由于采用软开关使开关的压力最小，所以器件的可靠性得到了改善。
- (4) 由于电压谐振脉冲较小，从而使电磁干扰和器件的

绝缘性不再成为主要问题。

(5) 由于开关频率很高，所以噪声很小。

软开关技术的主要缺点在于谐振回路增加了成本及复杂性。用于电动汽车的软开关和硬开关的功率转换器的比较见表 1.8-21。

表 1.8-21 电动汽车软开关与硬开关转换器的比较

项 目	硬开关	软开关
开关损失	严重	几乎为零
整体效率	一般	可能稍高
热排放要求	一般	可能稍低
硬件数	一般	多
总功率密度	一般	可能稍高
电磁干扰问题	严重	低
电压波动情况	严重	低
调节方案	多种	有限
成熟性	成熟	发展中
成本	一般	较高

应用电动汽车驱动中的软开关式直流变换器，除了要承受过大电压和电流外，还需要控制其工作在再生制动状态，以便使能量转换能够在驱动和再生制动状态下双向进行。

图 1.8-46 显示的三相电压供给式谐振直流逆变器是软开关逆变器技术发展的里程碑，适用于交流电动机(包括感应电动机、永磁无刷电动机和永磁混合电动机)。除此以外，还有许多改进的软开关式逆变器布局，如准谐振直流线路、串联谐振直流线路、并联谐振直流线路、同步谐振直流线路、谐振变换式、辅助谐振变换极和辅助谐振缓冲式逆变器。用于电动汽车驱动的软开关逆变器的研发指标有许多，如效率高于 95%，功率密度高于 3.5W/cm³，开关频率高于 10~20kHz，du/dt 低于 1000V/μs，零电磁干扰，车辆行驶期间无故障等。

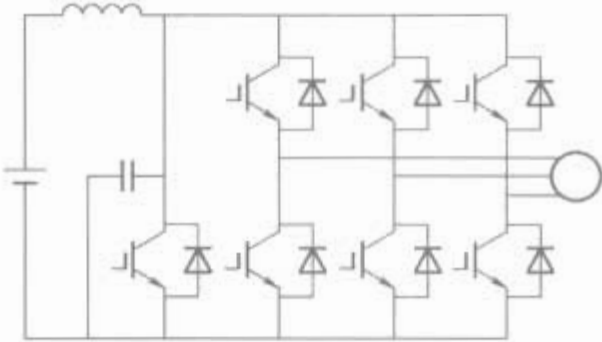


图 1.8-46 三相电压式谐振直流电路逆变器

开关磁阻电动机的软开关技术开发得很少。一种新的软开关逆变器，即所谓的零电压变换型，是专门为开关磁阻电动机设计的。这种新逆变器所有的主开关和二极管都能工作在零电压状态，器件的电压和电流压力统一，且具有较宽的工作范围，电路布局简单，所需硬件少，成本低。

5.1.3 微电子器件

现代微电子器件可大体分为微处理器、微控制器、数字信号处理器(DSPs)和传输机等。微处理器技术被认为是微电子技术发展的里程碑，如 8086、80186、80286、80386、80486、奔腾、奔腾 II、奔腾 III、奔腾 IV 和奔腾 M 等。微处理器是微机的 CPU，可用来编译指令，控制运行行为并执行所有的算法和逻辑运算。不像微处理器，微控制器如 8096、80196 和 80960 等，包括所有的资源如 CPU、ROM 或 EPROM、RAM、DMA、计时器、中断源、A/D 和 D/A

转换器及输入/输出接口等,可作单机、单片控制器使用。这样,基于电动汽车驱动系统的微处理器具有硬件最少、软件集中等优点。电动机控制专用数字信号处理器(DSPs),如TI公司的TMS320C24x/LC24x系列、TMS320C28x系列DSP内核中,集成了程序存储器ROM、数据存储器RAM、A/D、CAN、转速编码器接口、串行通信接口、通用IO接口及事件管理模块等,其最高处理能力达到400MIPS,完全满足高性能数字电动机复杂控制算法的要求。另外,传输机,如T400、T800和T9000,是为并行处理特别设计的,通过用多片传输机,任何复杂的控制算法都可以实现。

通过把微电子器件和功率器件集成到同一芯片上,便成了功率集成电路(PICs),俗称“智能功率”,其目的是进一步减小体积,降低成本并改善其可靠性。PIC可以包含功率模块、控制、保护、信息传递和制冷等。PIC合成存在的主要问题是高电压和低电压器件的绝缘,以及冷却问题。

5.1.4 控制策略

传统的线性控制,如PID,不能满足高性能电动机驱动的苛刻要求。近几年来,出现了许多先进的控制策略。适用于电动机驱动的控制策略的发展现状,包括自适应控制、变结构控制、模糊控制和神经网络控制等。

自适应控制,包括自调节控制和模型参考自适应控制,目前已经应用在电动汽车无换向器电动机驱动系统中。自调节控制运用一个识别模块来跟踪系统参数的变化,并通过控制器的自调整模块更新控制器的参数,从而获得理想的闭环控制性能。运用模型参考自适应控制,输出模型的响应,跟踪参考模型的响应,而不管系统模型的参数如何变化,基于利用参考模型和系统输出的差别的自适应算法,控制器的参数不断加以调整,从而得到理想的闭环控制性能。

变结构控制最近也应用到电动机驱动中。运用变结构控制,系统提供不敏感的参数特性,规定误差动态并简化所执行的操作。根据一系列的开关控制原理,系统必须按预先设定的轨道在相平面内运行,而不管系统参数如何变化。

模糊逻辑和神经网络等新技术也被引入电动机控制领域。模糊控制实质上是一种语言过程,它基于人类行为所使用的先前经验和试探法则。利用神经网络控制,控制器有可能解释系统的动态行为,然后自学并相应地进行自我调整。

5.2 直流电动机

直流电动机广泛用于电动机驱动系统。最早的直流电动机控制系统由一串电阻器和电动机串联或并联形成。电动机的电压等于电池电压减去电阻器上的电压降,并通过运用接触器短路一部分电阻而使电压升高。这种系统只适用于在额定转速运行和起动时只要求平稳加速的电动汽车驱动系统。虽然这种电阻控制方式简单且价廉,但由于大量的能量以热的形式损失了,因而其效率很低。另外,它不能进行平滑控制,运行不平稳,因而这种串电阻控制方式已被淘汰。直流斩波控制方式由于体积小,重量轻,效率高,可控制好,而且根据所选的加速度,能平稳加速到理想的速度,所以该控制方式在电力驱动领域得到了广泛应用。

直流电动机可分为励磁绕组式和永磁式直流电动机。前者有励磁绕组且磁场可由直流电流控制,而后者没有励磁绕组,但是永磁体磁场不可控制。由于技术成熟,控制简单,它们在各种电动汽车驱动系统中有广泛地应用。

5.2.1 基本结构

励磁绕组直流电动机的电枢与励磁绕组之间存在着相互作用。如图1.8-47所示,普通励磁绕组直流电动机分为他

励、串励、并励和复励等。没有外部控制时,它们在额定电压时的转矩/转速特性如图1.8-48所示。对于他励直流电动机,励磁电压和电枢电压可以互相独立控制,转矩/转速特性是线性相关的,转速随转矩的增大而减小,转速调节是通过调节电枢回路的电阻来实现的。对于串励直流电动机,励磁电流与电枢绕组的电流相等,转矩增加伴随着电枢电流的增大及磁通的增加,结果,转速下降使原方与感应电压保持平衡,转矩与转速成反比关系。对于并励直流电动机,励磁绕组与电枢绕组连接在同一电源上,其特性与他励直流电动机相似。对于复励直流电动机,串励绕组磁动势的方向与并励绕组的相同,其特性介于串励直流电动机与并励直流电动机之间,取决于串励与并励磁场的相对强弱。

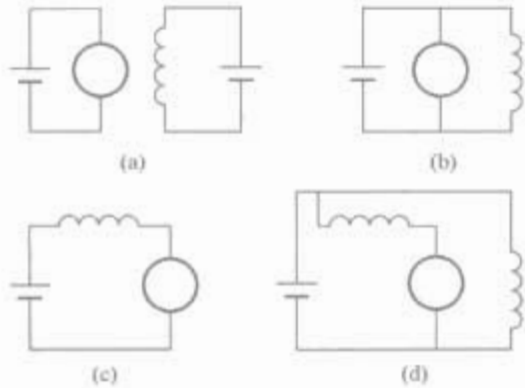


图 1.8-47 励磁绕组直流电动机
(a)他励; (b)并励; (c)串励; (d)短复励

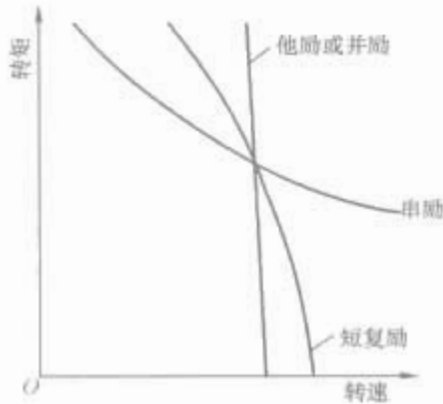


图 1.8-48 励磁绕组直流电动机的
转矩—转速特性曲线

由于串励直流电动机在低速时能提供高转矩,所以它广泛用于传统电动汽车驱动系统。它所提供的单位电流转矩在所有电动机中是最高的,这种特性能大大降低车辆加速与爬坡时的电池消耗。

永磁直流电动机用永磁体取代励磁绕组和磁极结构。与励磁绕组直流电动机相比,永磁直流电动机由于采用永磁体,大大节省了空间并且没有磁场损失,所以它的功率密度和效率都较高。永磁体的磁导率和空气的差不多,所以电枢反应减小,电磁交换得以改善。但是,永磁直流电动机的励磁不能控制,不能获得类似励磁绕组直流电动机的工作特性。

直流电动机换向器和电刷的存在造成转矩波动,并限制了电动机的转速,摩擦与射频干扰也比较严重,且需要定期维护,使得它的可靠性降低,从而限制了在电动汽车驱动领域的应用。直流电动机的优势在于其成熟性和简单。由于气隙磁通 Φ 和电枢电流 I_a 能分别控制,因而电动机转速 ω_m 和转矩 T 也能分别控制,所以直流电动机的控制很简单。无论是励磁绕组直流电动机还是永磁直流电动机,它们都满足以下基本方程

$$E = K_e \Phi \omega_m \tag{1.8-52}$$

$$U_a = E + R_a I_a \tag{1.8-53}$$

$$T = K_e \Phi I_a \tag{1.8-54}$$

式中： E 为反电动势； U_a 为电枢电压； R_a 为电枢电阻； K_e 称为反电动势常数或转矩常数。对于励磁绕组直流电动机来说， Φ 与可独立控制的磁场电流 I_f 线性相关；而对于他励、串励、并励或复励直流电动机来说，则 I_f 与 I_a 或 U_a 或与 I_a 、 U_a 都有关；但是，永磁直流电动机的 Φ 基本上是不可控制的。

直流电动机设计包括下列主要尺寸：电枢的外径与铁心长、电枢外径与铁心长之比的优化、气隙长度、磁极对数、电枢槽的个数、电枢齿宽与槽深、线圈绕组匝数、槽满率、换向器的小节数、换向装置、单位磁路的磁通密度、励磁电流、单位热回路中的热阻抗、转速、转矩和效率、单位质量转矩、铜和铁心质量等。

5.2.2 转速控制

一般而言，直流电动机的转速控制可以通过两种方法实现，即电枢控制和励磁控制。当直流电动机电枢电压减小时，电枢电流和电动机转矩就会降低，由此引起电动机转速降低。当电枢电压增加时，电动机转矩增加，引起电动机转速增加。由于电枢的最大允许电流不变，且磁场是固定的，电枢电压的控制可以在任何转速下保持最大转矩不变。然而，由于电枢电压不能超过其额定值，这种控制方法只适于直流电动机的工作转速低于基速的场合。另外，当电枢电压值恒定，直流电动机的励磁电压减弱时，电动机的感应电动势就会降低。由于电枢电阻很小，电枢电流增大的程度比磁场减弱的程度要大，因此，电动机转矩增加，电动机转速也随之增大。由于电枢的最大允许电流是常数，所以当电枢电压保持不变时，无论转速多大，感应电动势都是恒定的。因此，电动机所允许的最大功率恒定，允许的最大转矩随电动机转速的变化而逆向变化。所以，为使电动汽车的直流电动机有较宽的转速控制范围，电枢控制必须与励磁控制相结合。当电动机转速在零与基速之间时，励磁电流保持在额定值，采用电枢控制；当电动机转速超过基速时，电枢电压保持在额定值，采用励磁控制。采用电枢与励磁控制相结合的所允许的最大转矩与最大功率如图 1.8-49 所示。他励直流电动机在电动机和再生制动两种工作模式时的转矩—转速特性曲线如图 1.8-50 所示。

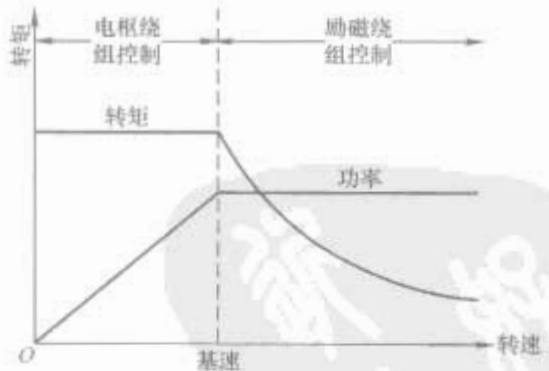


图 1.8-49 直流电动机的电枢与励磁绕组的混合控制

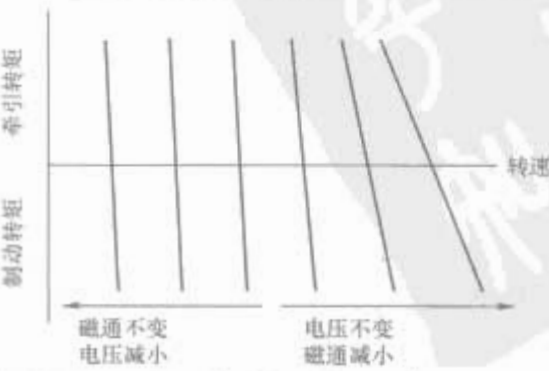


图 1.8-50 他励直流电动机的特性驱动曲线

5.3 感应电动机

目前，感应电动机驱动在各种无换向器电动机驱动中技术最成熟。感应电动机有两种类型，绕线式转子电动机和笼式电动机。绕线式感应电动机成本高，需要维护，缺乏坚固性，因而没有笼型感应电动机应用广泛，特别是在电动汽车的电力驱动中。笼型感应电动机简称感应电动机。感应电动机驱动除了具有无换向器电动机驱动的共同优点外，还具有成本低，坚固等优点，在电动汽车驱动中得到广泛应用。

5.3.1 系统结构

在电动汽车驱动中，感应电动机驱动分为单电动机型和多电动机型。图 1.8-51 是单电动机驱动的结构，由三相鼠笼感应电动机、三相电压型 PWM 逆变器、电子控制器、减速器和差速器组成。如前所述，多电动机系统由多个电动机、多个逆变器、集中或分布式控制器和可变速比的变速器组成。这两种结构各有各的优点，在现代电动汽车上都有应用。这两种结构的特点是：三相感应电动机经过专门设计，并与驱动桥集成为一体；三相 PWM 逆变器具有再生制动功能，并有轻微的谐波失真；电子控制器能完成电动机的各种驱动控制；采用固定速比的减速器，提供爬坡时的低速大转矩。

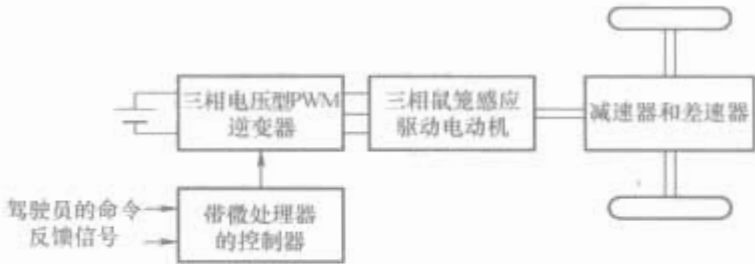


图 1.8-51 用于电动汽车的感应驱动电动机的基本结构

5.3.2 应用在电动汽车中的感应电动机

电动汽车驱动的感应电动机在原理上与工业中用的感应电动机基本相同。然而，这种电动机需要专门设计，转子铁心和定子铁心由薄硅钢片叠加而成，以减少铁损；鼠笼采用铜条，减少线圈损失；定子铁心采用 C 级绝缘，可直接用低黏度的油来冷却；采用铸铝机座来减轻电动机总重量，合理采用高电压和低电流设计，以减少功率逆变器的成本和体积；采用高速运行使电动机的尺寸和重量最小化，弱磁控制要求杂散电抗小。

为了优化电动机的几何形状和参数，通常使用 CAD 技术，如二维或三维有限元方法实现静态和动态电磁场分析。由于电动机起动时的表面效应会引起损失密度分布随时间变化，因此会在转子条和端环上产生严重的瞬时热应力。

感应电动机设计主要考虑定子铁心的内外径、铁心长度、气隙长度、磁级数、定子槽数、转子槽数、定子齿宽和槽深、转子齿宽和槽深、每相线圈匝数、槽满率，单位磁路的磁通密度、感应电流，单位热回路的热阻抗、转速、转矩和效率，单位质量转矩、铜铁心和磁铁心的重量等。

感应电动机在电动汽车中应用广泛，如通用汽车的 EV1 纯电动汽车，采用 102kW 感应电动机并配置两级减速齿轮作驱动；福特公司的 Ranger 电动汽车采用 66kW 感应电动机作驱动，最高车速达到 120km/h；日产汽车公司推出的 Avenue 电动汽车也采用感应电动机作驱动，输出功率为 55kW，最高转速为 7500r/min，最大转矩为 235N·m，比功率为 0.71kg/kW；韩国现代集团的 Santa Fe 燃料电池电动汽车也采用感应电动机作驱动，功率为 65kW。

“十五”期间，哈尔滨工业大学研制了电动汽车驱动用系

列感应电动机及其控制器，安装在解放牌混合动力城市公交车上。其中，水冷式感应电动机及控制器，额定功率为40kW，最大功率为80kW，比功率为1kW/kg，基速为3600r/min，最高转速为7000r/min，额定转矩为106N·m，最大转矩超过212N·m；自冷式感应电动机及控制器，额定功率为30kW，峰值功率为60kW，基速为1500r/min，最高转速为6000r/min。电动机本体最大效率超过92%，驱动系统最大效率大于90%，高效区(效率大于85%)占运行区域50%以上。控制器可工作在250~450V电压范围内，基于矢量控制四象限转速和转矩控制，可动态进行象限间、转矩与转速的模式切换，转速控制精度为±0.5%，转矩控制精度为±10%。电动和发电对称运行，具有CAN总线通信和数字、模拟接口，以及过电压、过电流、欠电压保护功能。

目前，一种新型的具有双转子结构的感应电动机正在引起人们的重视，并成为研究的热点。如图1.8-52所示，这种感应电动机被称为电气变速器，由定子、外转子和内转子组成。定子和内转子上绕有三相对称绕组；外转子具有双笼结构。

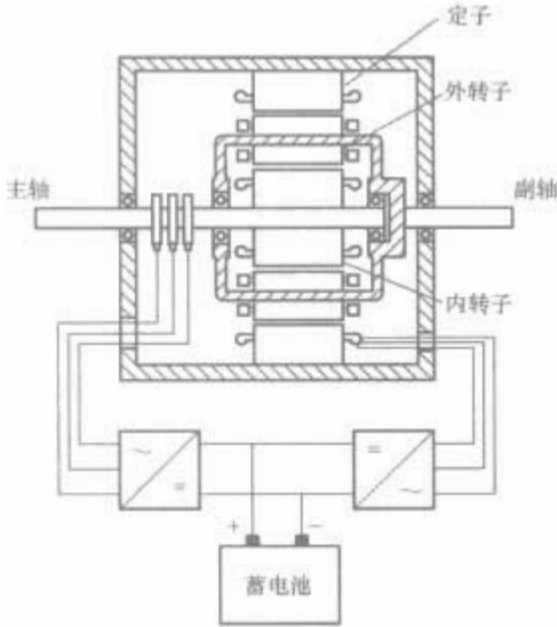


图 1.8-52 电气变速器的结构图

原理上，电气变速器由具有双转子结构的内电动机，和与普通感应电动机结构相同的外电动机组成。两台电动机通过一体式设计，在外转子处结合到一起，成为具有内气隙磁场和外气隙磁场相互耦合的一体式装置。

工作时，第一台电动机工作在发电机状态下，内转子与发动机输出轴相连，而第二台电机工作在电动机状态下，外转子与车辆主减速器相连。发动机驱动内转子转动，并在内转子绕组上产生感应电流。来自发动机的机械能被分为两部分，一部分转化为电能，通过滑环、电刷、电能变换装置，输入到第二台电动机的定子中，并在副轴上产生转矩。另一部分机械能则通过电磁场作介质，直接传递到副轴上。由于外转子的磁轭较薄，定子与内转子之间存在作用力。

电气变速器可以作为无级变速器，起动机和发电机，能够使发动机工作在最佳状态下，节能环保。蓄电池的加入可以使装配电气变速器的车辆成为混合动力系统。

5.3.3 逆变器

电动汽车驱动用感应电动机使用的几乎都是专用的三相电压型 PWM 逆变器，逆变器的设计很大程度上依赖于功率器件技术。选择功率器件的标准是：额定电压至少是蓄电池额定电压的两倍；额定电流必须足够大，不需要再并联功率器件；开关速度足够高。目前，现代电动汽车多采用基于逆变器的 IGBT。硬开关逆变器的拓扑结构几乎固定不变，所

以逆变器的设计通常取决于功率器件的选择和 PWM 变换方案。当选择 PWM 变换方案时，要求输出基波的幅值和频率能平稳变化；输出谐波失真最小；开关算法要求用尽可能少的硬件和软件实时执行；在蓄电池电压波动大的情况下，控制器不能失去控制。

电压控制型等面积 PWM 方案是专门为以蓄电池为动力的电动汽车感应电动机驱动设计的。等面积 PWM 明显的优点是谐波失真小，软件和硬件最少，能实时执行并允许直流电压波动。其基本原理是把一个正弦波分成若干份来估计脉宽，因此每个脉冲的面积等于同一个参考系下正弦波对应部分的面积。每个脉宽都可用数学方程式表示，直接取决于瞬时直流电压，因此，能够用最少的硬件和软件进行实时计算，并且自动调节变化的蓄电池电压。

人们也提出了许多改进的软开关逆变器的拓扑结构，如谐振直流电路、串联谐振直流电路、并联谐振直流电路、同步谐振直流电路、谐振变换、辅助谐振整流极和辅助谐振缓冲逆变器。其中，辅助谐振缓冲逆变器是专门为电动汽车驱动开发的。

通过采用辅助开关、谐振感应线圈和谐振缓冲电容可得到软开关的条件。辅助谐振缓冲逆变器的两种三相拓扑结构如图1.8-53所示。逆变器拓扑结构可使主功率元件和辅助开关在零电压开关(ZVS)状态下工作，而且，这些拓扑结构的寄生电感和杂散电容作为谐振分量的一部分，用来减少过流或过压给主功率开关带来的危害。

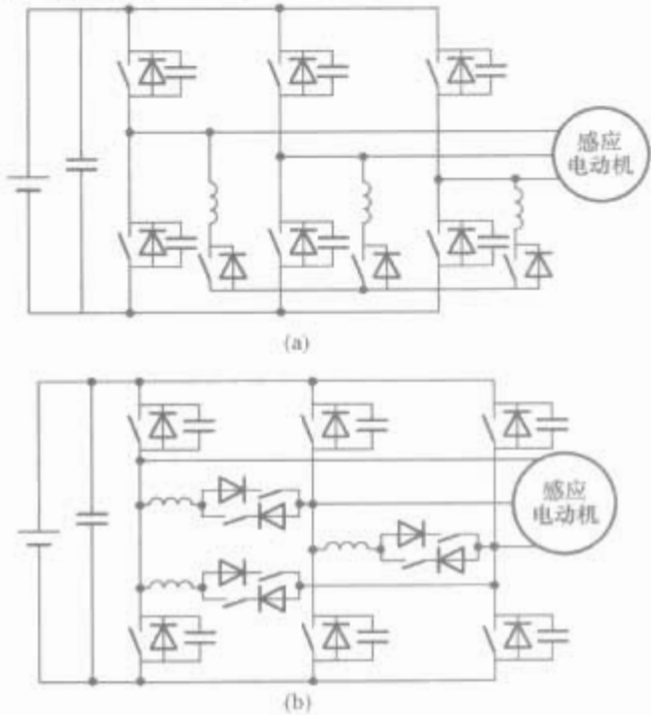


图 1.8-53 三相辅助谐振缓冲逆变器拓扑结构
(a)星形结构；(b)三角形结构

在图1.8-53所示的星形和三角形拓扑结构中，三角形结构在电动汽车驱动中更受青睐。它有大功率的容量，没有漂移电压或过压给辅助功率开关带来的危害，不需要另外安装电压或电流传感器，它的谐振开关没有跨接反并联的快速可逆恢复二极管，它的工作原理如图1.8-54所示。一个工

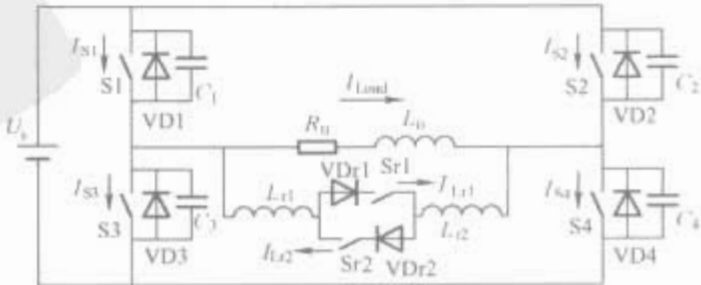


图 1.8-54 单相辅助谐振缓冲逆变器拓扑结构

作循环有 10 种工作模式，如图 1.8-55 所示。模式 0 ($t < t_0$) 是初始状态；模式 1 ($t_0 \sim t_1$)，Sr1 打开，谐振感应线圈的电流开始线性上升；模式 2 ($t_1 \sim t_2$)，S1 关闭，谐振感应线圈和缓冲电容在 S4 产生谐振， C_1 和 C_4 给直流电路电压充电， C_2 和 C_3 放电到零，给 S2 和 S3 提供 ZVS 状态；模式 3 ($t_2 \sim t_3$)，用 ZVS 打开 S2 和 S3，谐振感应线圈电流开始直线下降，VD2 和 VD3 开始续流；模式 4 ($t_3 \sim t_4$)，谐振感应线圈电流为零，可用 ZCS 关闭 Sr1，负载电流通过 VD2 和 VD3 继续续流；模式 5 ($t_4 \sim t_5$)，Sr2 打开，谐振感应线圈的电流开始线性上升；模式 6 ($t_5 \sim t_6$)，S2 和 S3 的电流方向发生改变，因此，谐振感应线圈的电流连续上升并超过负载电流，感应线圈的电流足够大时，储存的能量给缓冲电容充放电，S2 和 S3 闭合；模式 7 ($t_6 \sim t_7$)，谐振感应线圈和缓冲电容之间产生谐振，当 C_2 和 C_3 充完电、 C_1 和 C_4 放完电时，为打开 S1 和 S4 提供希望的 ZVS 状态；模式 8 ($t_7 \sim t_8$)，用 ZVS 打开 S1 和 S4，谐振感应线圈电流开始下降，VD1 和 VD4 导通；模式 9 ($t_8 \sim t_9$)，谐振感应线圈电流连续直线下降，当谐振感应线圈电流下降到零时，用零电流开关状态关闭 Sr2。下一个工作阶段是模式 0，整个工作过程重复循环。对应的波形如图 1.8-56 所示。

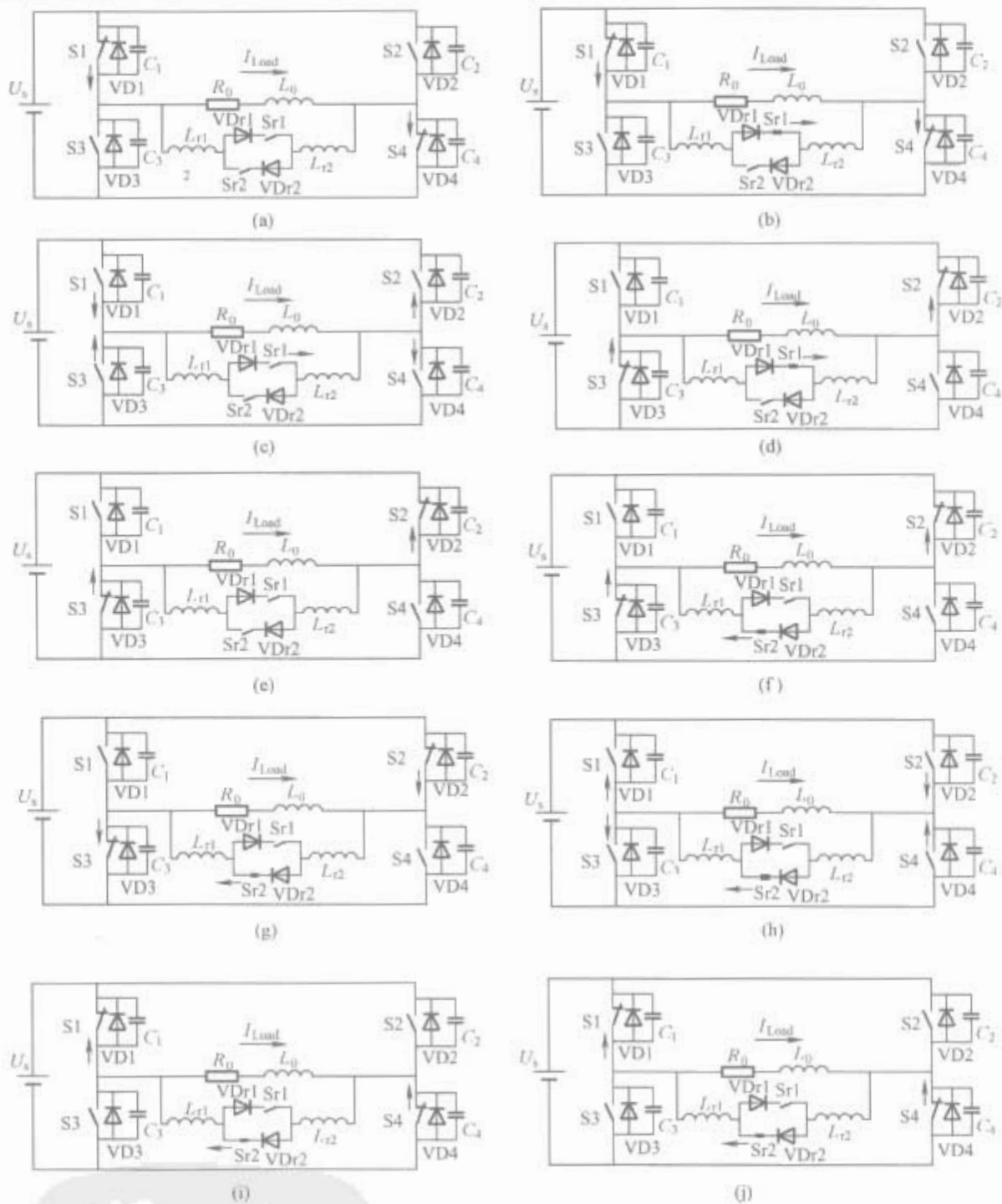


图 1.8-55 辅助谐振缓冲逆变器的 10 种工作模式

(a)模式 0；(b)模式 1；(c)模式 2；(d)模式 3；(e)模式 4；(f)模式 5；(g)模式 6；(h)模式 7；(i)模式 8；(j)模式 9

5.3.4 感应电动机的控制

感应电动机的直轴和交轴的磁耦合作用，导致动态模型的高度非线性。为了实现感应电动机的理想控制，许多控制方法被应用到电动汽车的感应电动机驱动中来，其中较为成功的是变压变频控制、磁场定向控制也称矢量控制或解耦控制、变极控制，另外，感应电动机的直接转矩控制被认为是非常适合于电动汽车感应电动机驱动的控制方法，成为研究的热点。

感应电动机转速控制的基本方程为

$$n = n_s (1 - s) = \frac{60f}{p} (1 - s) \tag{1.8-55}$$

变，因此，谐振感应线圈的电流连续上升并超过负载电流，感应线圈的电流足够大时，储存的能量给缓冲电容充放电，S2 和 S3 闭合；模式 7 ($t_6 \sim t_7$)，谐振感应线圈和缓冲电容之间产生谐振，当 C_2 和 C_3 充完电、 C_1 和 C_4 放完电时，为打开 S1 和 S4 提供希望的 ZVS 状态；模式 8 ($t_7 \sim t_8$)，用 ZVS 打开 S1 和 S4，谐振感应线圈电流开始下降，VD1 和 VD4 导通；模式 9 ($t_8 \sim t_9$)，谐振感应线圈电流连续直线下降，当谐振感应线圈电流下降到零时，用零电流开关状态关闭 Sr2。下一个工作阶段是模式 0，整个工作过程重复循环。对应的波形如图 1.8-56 所示。

式中： n 为电动机转速； n_s 为同步旋转磁场转速； p 为磁极对数； f 为电源频率。通过改变 f 、 p 和 s 来控制电动机转速。

5.3.4.1 变压变频控制

感应电动机驱动的变压变频控制功能框图如图 1.8-57 所示，此方法是在基频以下用恒压恒频控制，基频以上用变频恒压控制。在频率很低时，定子阻抗下降，通过提高电压来补偿电源电压与感应电动势之间的压降。感应电动机的驱动特性如图 1.8-58 所示，可分为三段，第一段在电动机频率低于基频时，产生额定转矩，称为恒转矩区；在第二段，定子电压保持恒定，转差增加到最大值，电动机功率维持在额定值不变；在高速区，转差维持常数，而定子电流衰减，

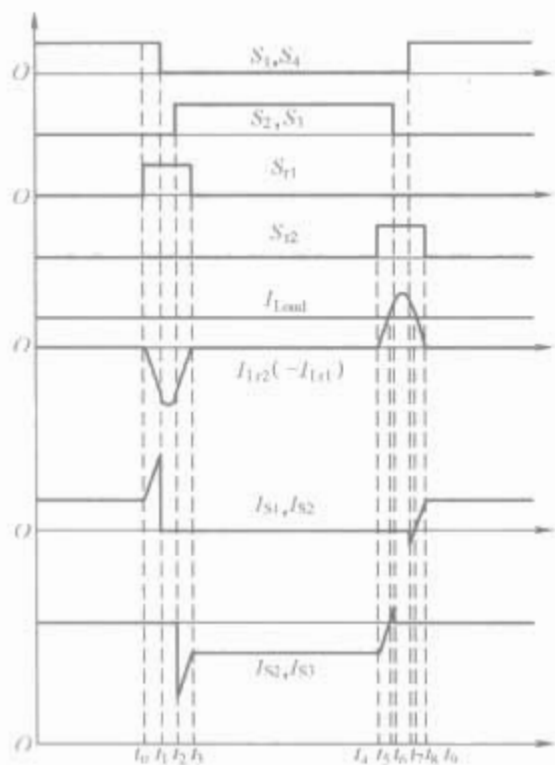


图 1.8-56 辅助谐振缓冲逆变器波形

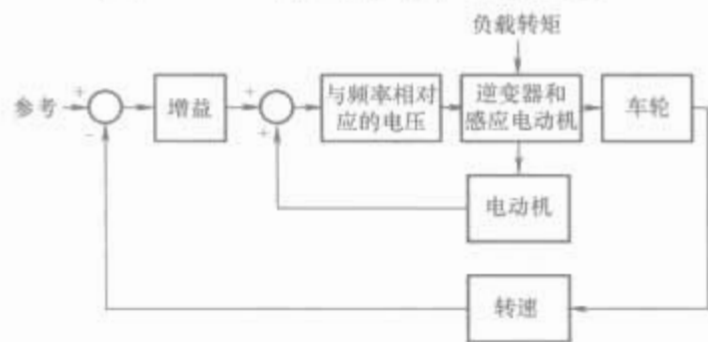


图 1.8-57 变压变频控制的感应电动机驱动系统

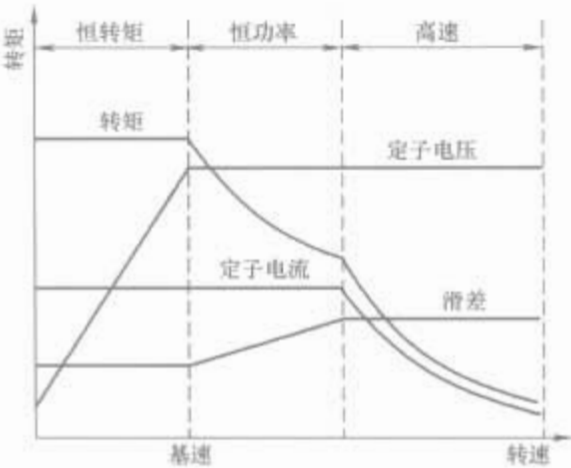


图 1.8-58 感应电动机的特性曲线

转矩以速度的平方减少。因为变压变频控制方法具有气隙磁通偏移和延时响应等缺点，所以在高性能电动汽车的驱动中较少使用这种方法。

5.3.4.2 矢量控制

矢量控制在电动汽车感应电动机驱动控制中应用广泛。

通过使用矢量控制，把静态参考坐标系($d-q$ 坐标系)变换为同步旋转坐标系($x-y$ 坐标系)下的新数学模型，如图 1.8-59 所示。这样，电动机的所有变量，如电源电压 u_s 、定子电流 i_s 、转子电流 i_r 和转子磁通链 λ_r 在稳态时可用标量表示。当 x 轴与转子磁通链矢量的方向一致时，参

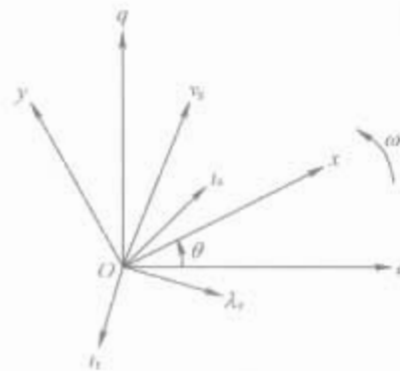


图 1.8-59 普通同步旋转 $x-y$ 轴坐标系

考坐标系($\alpha-\beta$ 坐标系)就与转子磁通同步旋转，如图 1.8-60 所示。这里 $i_{s\alpha}$ 和 $i_{s\beta}$ 分别是定子电流在 α 轴和 β 轴上的分量。电动机转矩 T 为

$$T = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} \lambda_r i_{s\beta} \tag{1.8-56}$$

式中： M 是绕组间的互感； L_r 是转子绕组的自感。

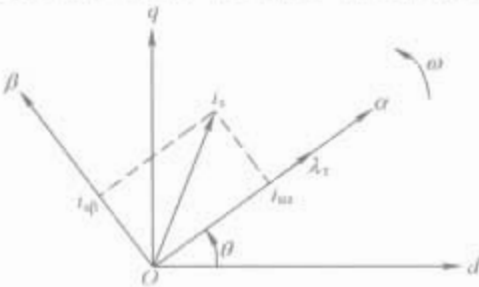


图 1.8-60 与转子磁通同步旋转的 $\alpha-\beta$ 轴坐标系

λ_r 可写成 $M i_{s\alpha}$ ，因此转矩方程可写成

$$T = \frac{3}{2} p \frac{M^2}{L_r} i_{s\alpha} i_{s\beta} \tag{1.8-57}$$

此转矩方程与他励直流电动机的转矩方程十分相似， $i_{s\alpha}$ 类似于励磁电流 I_f ，而 $i_{s\beta}$ 类似于电枢电流 I_a 。因此， $i_{s\alpha}$ 可作为 i_s 的励磁分量，其作用是建立气隙磁通；而 $i_{s\beta}$ 可作为 i_s 的转矩分量，产生期望的电动机转矩。因此，只要保持励磁分量不变，通过采用矢量控制方法调节转矩分量，就可以有效地控制电动机转矩。感应电动机驱动产生类似他励直流电动机理想的暂态快速响应。矢量控制的感应电动机驱动框图如图 1.8-61 所示。

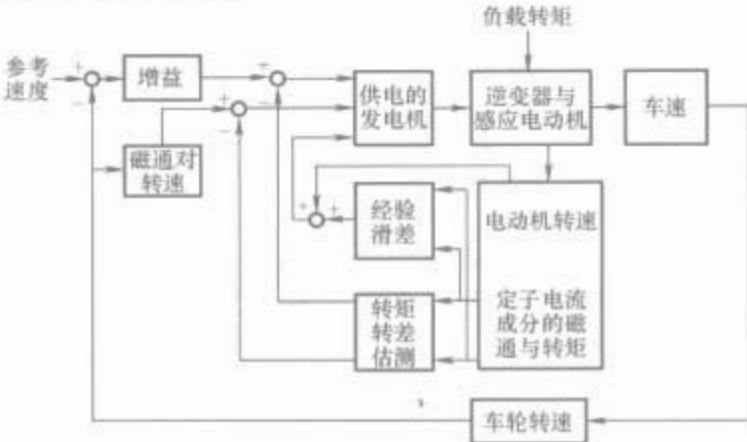


图 1.8-61 感应电动机矢量控制驱动系统

为获得上面的矢量控制方案，转子磁通链矢量应与 α 轴一致，可通过转差率 ω_{slip} 控制来解耦

$$\omega_{slip} = \frac{R_r i_{s\beta}}{L_r i_{s\alpha}} \tag{1.8-58}$$

式中： R_r 是转子绕组的电阻。

自矢量控制问世以来，出现了许多实现矢量控制的方法，这些方法基本上分成两类，即直接矢量控制和间接矢量控制。直接矢量控制需要直接测量转子磁通，增加了实施的复杂性和低速测量时的不可靠性，因此很少用于电动汽车驱动；间接矢量控制是用计算代替直接测量决定转子磁通。间接矢量控制比直接矢量控制更容易实现，因此，间接矢量控制在高性能电动汽车驱动中的应用具有很好的前景。

5.3.4.3 直接转矩控制

直接转矩控制直接在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型，控制电动机的磁链和转矩。在感应电动机空间矢量等效电路图 1.8-62 中，定子磁链为

$$\lambda_s = \int (u_s - i_s R_s) dt \tag{1.8-59}$$

忽略定子电阻影响，有 $\lambda_s \approx \int u_s dt$ 。因此，控制定子电压

$R'_r = \alpha^2 R_r, R'_m = \alpha R_m;$

式中： p 是极对数； R_s 是定子电阻； R_r 是转子电阻； R_m 是铁心损耗等效电阻； M 是互感； L_s 是定子自感； L_r 是转子自感； ω 是电源角频率； T 是电动机转矩； P_m 是机械损耗； A 是定子电流转矩分量 i_{sq} 与定子电流励磁分量 i_{so} 之比。 T 和 ω 给定，为使损耗最小，使不同的 A 对应不同的 P_{loss} 。设 $dP_{loss}/dA = 0$ ，可推导出获得优化效率的条件

$$A = \sqrt{\frac{R_s + R'_m}{R_s + R'_r}} \tag{1.8-62}$$

因此得到 FOC 效率优化的指令值 i_{sq}^* 和 i_{so}^*

$$i_{so}^* = \sqrt{T^* / (3pM'A)} \tag{1.8-63}$$

$$i_{sq}^* = T^* / (3PM'i_{so}^*) \tag{1.8-64}$$

R_s 随温度的变化而变化， R_m 受频率影响， α 随磁饱和度的变化而变化。因此，优化率 A 需要不断更新。

5.4 永磁电动机

永磁驱动电动机的分类多种多样，根据输入电动机接线端的波形，可分为永磁直流电动机和永磁交流电动机。永磁交流驱动电动机没有电刷、换向器或滑环，因此也称为永磁无刷驱动电动机。根据输入电动机接线端的交流波形，永磁无刷电动机可分为永磁同步电动机和永磁无刷直流电动机。

永磁同步电动机的输入是交流正弦或近似正弦波，采用连续转子位置反馈信号来控制换向；而永磁无刷直流电动机输入的是交流方波，采用离散转子位置反馈信号控制换向。由于方波磁场与方波电流之间相互作用而产生的转矩比正弦波大，所以，永磁无刷直流电动机的功率密度大，但是由功率器件的换向电流引起的转矩脉动也大，而正弦波产生的转矩基本是恒转矩或平稳转矩。

最近，人们为电动汽车驱动开发了一种新型的永磁无刷电动机，即永磁混合式电动机驱动系统。这种电动机的特点是既有永磁体又有励磁绕组。永磁体嵌入转子中，励磁绕组固定于定子上。这种驱动电动机可以不用采用任何特殊的控制策略，而通过调节直流励磁电流控制气隙磁通，就可以获得比其他永磁电动机宽的转速范围。特别是在高速区，弱磁控制能很好地满足电动汽车恒功率运行的要求。由于这种电动机的结构和磁路与其他电动机不同，它可以归为另一类永磁无刷电动机。因此，永磁电动机可分为永磁直流电动机、永磁同步电动机、永磁无刷直流电动机、永磁混合式电动机，后三类统称为永磁无刷电动机。

5.4.1 永磁材料

用于电动机的不同永磁材料的典型性能如图 1.8-68 所示，高斯(G)和奥斯特(Oe)分别是磁通密度和矫顽力的非国际单位，

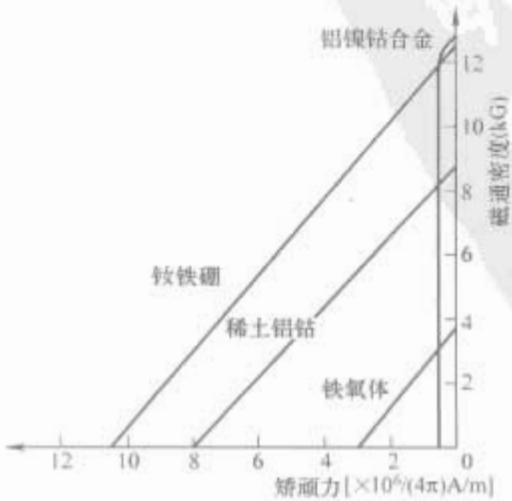


图 1.8-68 永磁材料的退磁特性曲线

广泛应用在磁场中， $1G=10^{-4}T$ 和 $1Oe=10^3/(4\pi)A/m$ 。铁氧体价格低廉，而且其去磁特性几乎是一条直线，是传统永磁电动机常用的永磁材料，但由于铁氧体的磁能极低，使电动机体积相当庞大。铝镍钴材料剩磁高，但矫顽力低，抗去磁能力低，限制了它在电动机中的应用。钐-钴(Sm-Co)材料剩磁和矫顽力都相当高，但价格昂贵限制了它在电动机中的广泛应用。钕-铁-硼(Nd-Fe-B)永磁材料具有最高的剩磁和矫顽力，价格相对低廉，使得它在永磁电动机中具有很好的应用前景。永磁材料的另一个重要参数是最大磁能积，用来衡量最大存储能量。表 1.8-22 是典型永磁材料性能的主要情况。

表 1.8-22 典型永磁材料的性能

项 目	钕-铁-硼	钐-钴	铝镍钴	铁氧体
剩余磁感应强度 B_r (kG)	12.5	8.7	12.8	3.8
矫顽力 H_c [$\times 10^3/(4\pi)A/m$]	10.5	8.0	0.6	3.0
最大磁能积 BH_{max} [$MG \times 10^3/(4\pi)A/m$]	36.0	18.3	5.5	3.5
回复磁导率 μ_r	1.8	1.0	4.0	1.0
居里温度($^{\circ}C$)	310	720	800	310
温度系数($\%/^{\circ}C$)	-0.13	-0.04	-0.03	-0.19

永磁材料的特性通常与温度有关，一般永磁体随温度的增加而失去剩磁，如果永磁体的温度超过居里温度，则其磁性为零。退磁特性曲线也随温度变化，在一定温度范围内，其变化是可逆的，且近似线性。因此，在设计永磁电动机时，必须考虑电动机运行过程中温度的变化范围。

5.4.2 永磁无刷电动机

永磁无刷电动机具有如下优点：

- (1) 高能永磁材料励磁，功率密度提高。
- (2) 转子无绕组，无铜损，效率高于感应电动机。
- (3) 电动机发热主要集中在定子上，易于采取措施散热。
- (4) 永磁励磁不受制造缺陷、过热或机械损坏的限制，可靠性较高。
- (5) 转子电磁时间常数小，动态性能好。

永磁无刷电动机的设计主要考虑定子铁心的内外直径、铁心长度、气隙长度、永磁材料性能、磁极数、定子槽数、定子齿宽和槽深、定子每相线圈的匝数、槽满率，永磁体的结构和尺寸，单位磁路的磁通密度、感应电流，单位热路的热阻抗，转速、转矩和效率，单位质量转矩，以及铜、磁性铁心和永磁材料的质量。

5.4.2.1 系统结构

用于电力驱动的永磁无刷电动机的结构与感应电动机相似，主要可选的结构有单电动机和多电动机驱动，以及固定速比和可变速比变速器等。单电动机驱动系统的结构主要由永磁无刷电动机、电压型逆变器、电子控制器、减速器和差速器组成。与感应驱动电动机相比，其基本结构主要有两点不同：

- (1) 永磁无刷电动机不仅仅局限于三相，更高相位的电动机可以减小相电流，降低功率元件的额定电流。
- (2) 逆变器除了能为正弦波永磁无刷电动机产生 PWM 波外，还要求能为方波永磁无刷电动机产生方波。

5.4.2.2 永磁同步电动机

如果励磁绕组用永磁体代替，传统的同步电动机就变成永磁同步电动机。正弦波定子电流和正弦反电动势相互作用产生转矩。因此，传统同步电动机广泛采用的 $d-q$ 坐标变换同样适合永磁同步电动机。这类电动机在开环或闭环控制

下都能运行，只在执行复杂控制策略时采用转子位置传感器。与绕线转子同步电动机类似，永磁同步电动机的转子与旋转磁场同步旋转，旋转磁场的转速取决于电源频率。永磁同步电动机产生理想的恒转矩或称平稳转矩。

根据永磁体在转子上的安装位置不同，永磁同步电动机可以分为表面式和内置式。表面式永磁同步电动机的优点是结构简单，由于永磁体的磁导率接近空气，所以永磁同步电动机有较大的有效气隙，电枢反应大大降低。内置式永磁电动机有较高的磁显性，可以产生额外的磁阻转矩分量，这在恒功率运行时很有用，将永磁体嵌入转子，可以保持高速运行时的机械完整性。

永磁同步电动机的控制及其控制策略与感应电动机相似，如变频变压控制和矢量控制仍可使用，弱磁控制技术也可以在电动机恒功率运行时实现。

永磁同步电动机在电动汽车中应用广泛。日本的汽车公司普遍在其推出的电动汽车中采用永磁同步电动机。如丰田汽车公司的 Prius 混合动力电动汽车采用 50kW 永磁同步电动机，在 1200r/min 以下可输出最大转矩 400N·m。Prius 上的发电机也采用永磁同步发电机，最高转速由原来的 6500r/min 提高到了 10000r/min。丰田汽车公司还在它的 RAV4 电动汽车上也采用了 50kW 的永磁同步电动机。日产汽车公司的 Altra 电动汽车也采用永磁同步电动机，功率为 62kW。在本田汽车公司的 IMA 混合动力系统中，超薄的永磁同步电动机安装在发动机与无级变速器之间，最大能够提供 15kW 的功率和 139N·m 的辅助转矩。

“十五”期间，中国科学院电工研究所、天津大学开发出了各自的永磁同步电动机，其中中国科学院电工研究所开发出最大功率为 28kW、最大转矩为 153N·m，以及最大功率为 7kW、最大转矩为 56N·m 的永磁同步电动机都用在了东风混合动力轿车上。天津大学研制的永磁同步电动机最大功率为 45kW、最大转矩为 100N·m、比功率为 1.1kW/kg、系统最高效率为 95%，用在了天津清源纯电动轿车上。上海御能动力科技有限公司开发了一系列永磁磁阻同步式电动机，如安装在长安汽车(集团)有限责任公司混合动力电动轿车上的比功率为 0.94kW/kg、系统最高效率为 91% 的电动机，采用风冷结构，能够频繁起停发动机，消除怠速，并对发动机提供辅助动力，回收部分车辆制动能量。

5.4.2.3 永磁无刷直流电动机

如果交换永磁直流电动机的定子和转子，就变成了永磁无刷直流电动机。这类电动机的显著优点是无刷，消除了电刷带来的许多问题；而且方波电流和方波磁场相互作用可以产生大转矩。一相解耦型永磁无刷直流电动机与永磁同步电动机相比，有更好的动态特性和弱磁控制能力。

尽管永磁同步电动机和永磁无刷直流电动机的结构和数学模型类似，但它们的静态和动态特性却不同。永磁同步电动机与绕线转子同步电动机的数学模型类似，电动机方程变换从 $a-b-c$ 三相变量转变成 $d-q$ 两相变量，使在 $a-b-c$ 坐标下正弦变化的电感在 $d-q$ 坐标下保持不变，从而推导出永磁同步电动机的 $d-q$ 模型。相反，由于永磁无刷直流电动机的反电动势是方波，其电感在 $a-b-c$ 坐标下不是按正弦规律变化，转换到 $d-q$ 坐标上也不能使电感保持不变，所以变换方程用处不大，因此，永磁无刷直流电动机用 $a-b-c$ 模型。

摒弃标准的定子结构，人们专门为电动汽车驱动开发了一种多相多极相解耦的永磁无刷直流电动机。一个五相 22 极相解耦永磁无刷直流驱动电机如图 1.8-69 所示。电机有

20 个定子槽，一个线圈的两边分别放在相邻的定子槽 1 和定子槽 2 里，同相的另一个线圈放在定子槽 11 和定子槽 12 里，这两个线圈串联在一起。其他绕组按同样的方法放置。转子由 22 块永磁体组成，形成 22 个磁极，相邻的磁极构成一对磁极，这表明相邻两个槽距是 11/10 极距。每极每相的槽数是非整数排列，定子与转子在任何位置的电磁力是一样的，因此可以消除永磁电动机产生的齿槽效应引起的转矩波动。当 S 极的槽内电流流向读者，N 极的槽内电流背离读者时，如图 1.8-69 所示，转子产生的转矩方向是逆时针的，反之亦然。通过定子槽与转子磁极的配合，任何时刻都有四相绕组通电，一相绕组不通电。当转子位置处于图 1.8-69 所示的位置时，A 相不通电。每相绕组的导通角为 144° ，超过了半个周期，相邻两相相隔 36° 。导通状态由转子位置传感器的反馈信号决定，传感器由安装在电动机机座(端盖)的光电器件和安装在转子轴上的齿盘构成。反馈信号有两个作用：通过判断转子位置来决定每相绕组的通电状态；为控制器提供转速信号。由换向逻辑决定电动机的旋转方向，换向频率要与电动机转速相匹配。通过调节电源电压很容易实现这类电动机的速度控制。

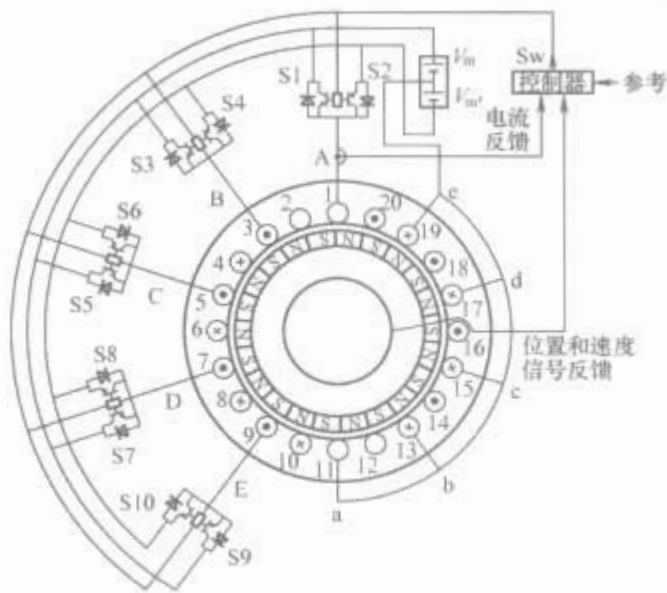


图 1.8-69 五相 22 极相解耦永磁无刷直流电动机

无刷直流电动机在电动汽车中应用广泛。如日本东京电力股份有限公司开发的 IZA(伊扎)电动汽车使用 4 台无刷直流电动机驱动整车，每台电动机最大功率可达 25kW，转矩为 42.5N·m。本田汽车公司生产的混合动力电动汽车也采用无刷直流电动机作驱动，电动机最高转速可达 8750r/min，最大功率为 49kW，转矩可达 275N·m。戴姆勒-克莱斯勒公司的 ZyteK 电动汽车采用最大功率为 30kW 的无刷直流电动机，最大车速为 97km/h，续航里程可达 160km。

“十五”期间，上海安乃达驱动技术有限公司开发了无刷直流电动机，应用在同济大学燃料电池电动汽车上。电动机采用水冷结构，最大功率为 65kW、最大转矩为 125N·m。北京理工大学电动车辆工程研究中心联合有关企业，开展了稀土永磁电动机及其控制系统的开发，采用永磁体加增磁绕组直流电动机驱动控制技术，发明了全新的牵引电动机自动控制模式，研制出在纯电动大客车上使用高可靠性、低成本的最大功率为 125kW 的直流电动机。定子为钕铁硼加增磁绕组励磁，转子采用无槽结构，风冷结构。驱动系统高效区宽，额定效率达到 93%。在低速大转矩、控制稳定性，以及成本方面优于传统电动机驱动系统，具有原创性。

5.4.2.4 永磁混合式电动机

如果在永磁直流电动机中加入附加励磁绕组，就可以加宽转速范围。关键是控制励磁电流，在高速恒功率区运行

时,对永磁体产生的气隙磁场进行弱磁控制。由于既有永磁体又用励磁绕组,所以叫永磁混合式电动机。永磁混合式电动机一般采用串联和并联结构。由于永磁体磁导率低,串联结构通常要求感应电动势比较高。这类电动机的缺点是结构相对比较复杂。

图 1.8-70 所示的是一种永磁混合式驱动电动机,它独特的结构由爪型转子、固定励磁绕组和定子组成。永磁体嵌入转子中,励磁绕组放在内转子和外转子之间的环行固定区域里。永磁磁通分量 ϕ_{pm} 和励磁磁通分量 ϕ_l 在气隙中叠加形成气隙磁通,这样气隙磁通 ϕ_a 可以通过调节励磁绕组的直流电流来控制。励磁电流变化引起气隙磁通的典型变化如图 1.8-71 所示,使理想的弱磁作用得以实现。

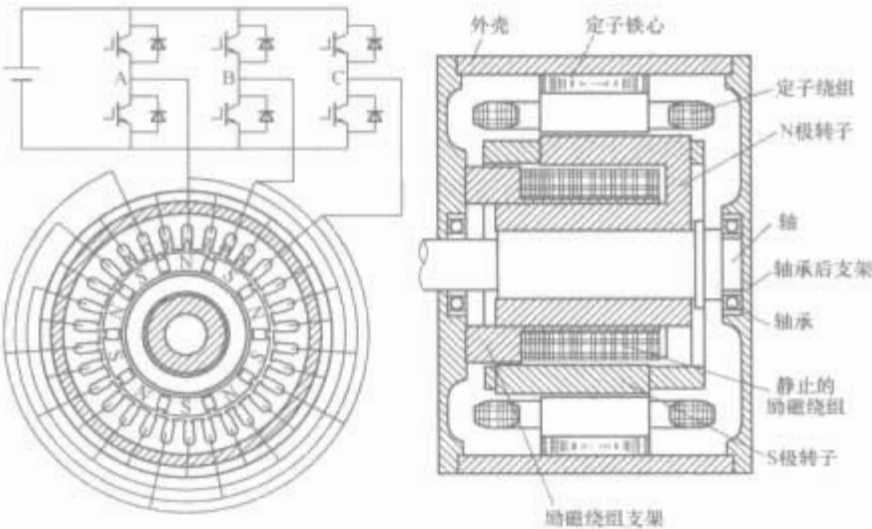


图 1.8-70 永磁混合式电动机

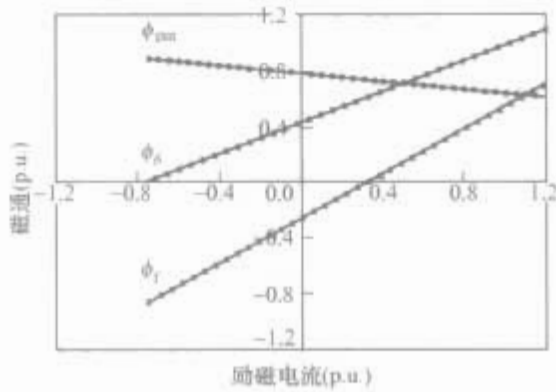


图 1.8-71 永磁混合式电动机的弱磁作用

由于电动机的定子绕组的电流是正弦分布,气隙磁通密度实质上也是正弦波形,因此采用 $d-q$ 模型。系统方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_l \\ e_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_l \\ i_{pm} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{sl} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 \\ L_{fs} & 0 & L_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_l \\ i_{pm} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 & 0 \\ L_d & 0 & L_{sl} & L_{s(pm)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_l \\ i_{pm} \end{bmatrix} \quad (1.8-65)$$

可简写为

$$[v] = [R][i] + \frac{d}{dt}[L][i] + \omega[G][i] \quad (1.8-66)$$

式中: $[v]$ 是电压矩阵,其中 u_d 、 u_q 、 u_l 和 e_{pm} 分别是 d 轴、 q 轴、励磁绕组和永磁激励电压; $[i]$ 是电流矩阵,其中

i_d 、 i_q 、 i_l 和 i_{pm} 分别是 d 轴、 q 轴、励磁绕组和永磁激励电流。由于电动机结构的独特性, $[L]$ 和 $[G]$ 的感应系数用三维有限元方法可以求得。因此转矩表示为

$$T = p [i]^T [G] [i] \quad (1.8-67)$$

永磁混合电动机的独特结构为控制系统提供了一个附加的控制变量,即励磁电流 i_l 。在轻载区,可人为减小气隙磁通来降低电动机的总损耗,提高电动机效率。在高速区,可进行弱磁调节,使恒功率工作范围变宽。如果负载功率和电动机转速给定,就可以优化合成相应的端电压和励磁电流。优化效率的速度控制系统功能框图如图 1.8-72 所示。PI 调节器从速度误差 $(\omega^* - \omega)$ 来减小转矩参考值 T^* , 基于电动机速度和转矩参考值,模糊逻辑控制器用于调节励磁电流参考值 i_l^* 和估计气隙磁通参考值 ϕ_a^* , 从而控制电动机在最优效率点工作。矢量控制器能够对励磁分量和转矩分量分别进行调节,获得良好的动态特性。永磁混合电动机的技术参数见表 1.8-23,整个工作范围的效率优化如图 1.8-73 所示。

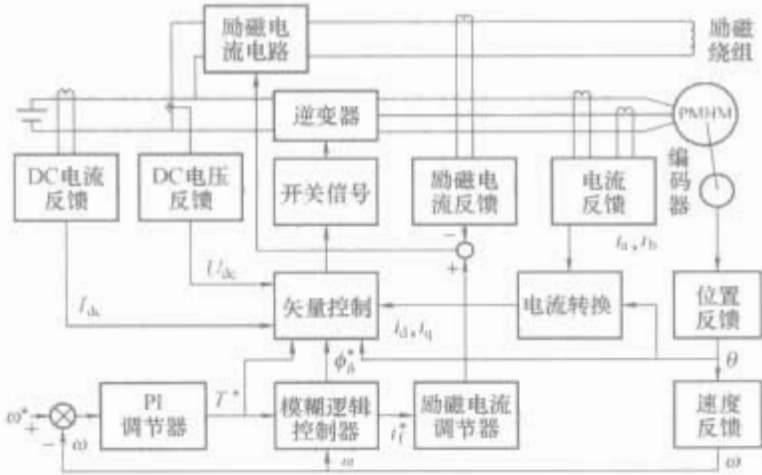


图 1.8-72 永磁混合式无刷驱动电动机的速度控制系统

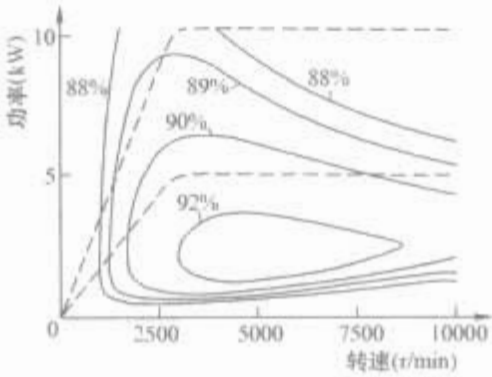


图 1.8-73 永磁混合式无刷驱动电动机的效率优化示意图

表 1.8-23 永磁混合式驱动电动机技术参数

电动机参数		定 子		转 子	
额定功率 (kW)	5	槽数	30	极对数	10
额定电压 (V)	270	外径 (mm)	210	外圆外径 (mm)	146
额定转速 (r/min)	1000	内径 (mm)	148	外圆内径 (mm)	118
相数	3	铁心长度 (mm)	58	内圆外径 (mm)	65
		绕组类型	双层	内圆内径 (mm)	38
		线圈匝数	64	永磁材料	Nd-Fe-B

这种驱动电动机具有如下优点和特点：

- (1) 采用独特的爪型转子结构，漏磁最小，结构紧凑。
- (2) 励磁绕组固定于定子内圈，使电动机轴向长度变短，材料消耗减少。
- (3) 由于既有永磁体又有励磁绕组，所以气隙磁通密度和功率密度高。通过采用磁通集中排列来安装永磁体，使其气隙磁通密度高于单独安装的永磁体。
- (4) 通过调节直流励磁电流的方向和大小，气隙磁通可以灵活调节，因此，转矩—转速特性能满足电动汽车驱动的特殊要求。
- (5) 调节励磁电流可以减弱永磁体产生的气隙磁通，使恒功率运行的速度范围显著提高。

(6) 适当调节电源电压和直流励磁电流，可以优化电动机驱动整个运行范围的效率图，因此可以提高电动汽车驱动，如爬坡时低速高转矩和巡航时高速低转矩工作区的效率。

5.5 开关磁阻电动机

1883 年，开关磁阻电动机最早用于机车牵引。直到现代功率电子学和大功率计算设备的出现，开关磁阻电动机的潜能才得以充分发挥。一般开关磁阻电动机驱动系统由开关磁阻电动机、功率变换器、传感器和控制器四部分组成，如图 1.8-74 所示。开关磁阻电动机起关键作用，它可将电能转变成机械能。图 1.8-75 显示了三种开关磁阻电动机的基本结构，它们是根据不同的定子和转子磁极数来区分的。



图 1.8-74 开关磁阻电动机驱动的基本构成

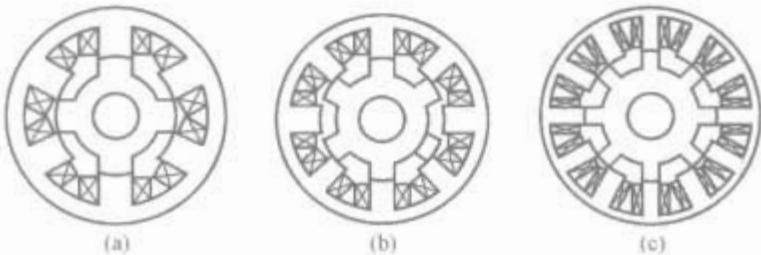


图 1.8-75 开关磁阻电动机的基本结构
(a)6/4 极；(b)8/6 极；(c)12/8 极

5.5.1 工作原理

图 1.8-76 所示是四相 8/6 极开关磁阻驱动电动机，图中只画出了其中一相绕组的情况。由于定子和转子极是凸极结构，所以每相绕组的电感 L 随转子位置的变化而变化，如图 1.8-77 所示。开关磁阻电动机的工作原理遵循“磁阻最小”的原则，如图 1.8-76 所示，当 B 相绕组受到激励时，为减小磁路的磁阻，转子顺时针旋转，直到转子极 2 与定子极 B 相对，此时磁路的磁阻最小（电感最大）。然后，切断绕组 B 的激

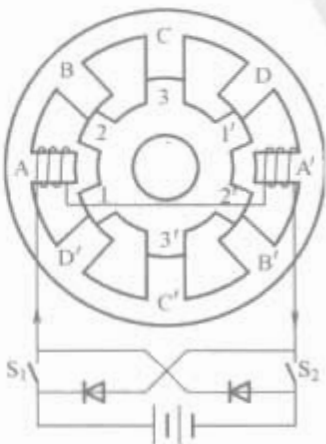


图 1.8-76 四相 8/6 极
开关磁阻电动机

励，给绕组 A 施加激励，磁阻转矩使转子极 1 与定子极 A 相对。转矩方向一般指向最近的一对磁极相对的位置。因此，根据转子位置传感器的反馈信号，相绕组按 B—A—D—C 的顺序导通，使转子沿顺时针方向连续旋转。

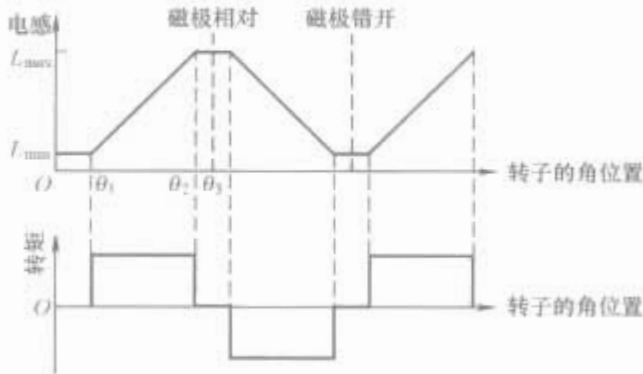


图 1.8-77 电感和恒电流转矩
与转子位置的关系曲线

根据磁共能原理，每相转子在不同位置产生的磁阻转矩为

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W'(\theta, i)}{\partial \theta} \tag{1.8-68}$$

式中： θ 是转子位置角； i 是相绕组电流； $W'(\theta, i)$ 是磁共能，即磁化曲线下的面积。如图 1.8-78 所示，其面积可表示为

$$W'(\theta, i) = \int_0^i \psi(\theta, i) di \tag{1.8-69}$$

磁链 $\psi(\theta, i)$ 可写成 $\psi(\theta, i) = L(\theta, i)i$ ，所以

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i L(\theta, i) di^2 \tag{1.8-70}$$

特定情况下，开关磁阻电动机没有磁饱和，电感与相绕组电流无关，可推导出磁阻转矩为

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \tag{1.8-71}$$

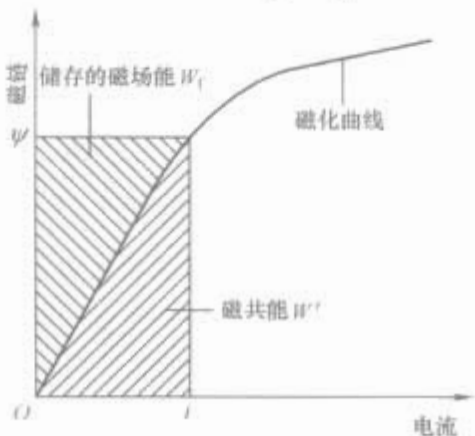


图 1.8-78 磁共能的定义

在恒定相绕组电流 i 下，转矩的波形如图 1.8-77 所示。当考虑磁饱和时，电感是转子位置角度和相绕组电流的函数。电感、磁链和转矩的非线性特性曲线分别如图 1.8-79～图 1.8-81 所示。

从以上分析可以看出开关磁阻电动机的两个显著特点，一是转矩的方向不受相电流方向的影响，另一个特点是：当电感增加时，产生电动机转矩（ $dL/d\theta > 0$ ）；相反，产生负转矩即制动转矩。所以，每相只在半极距内产生正转矩，因此易产生转矩波动，通过增加电机相数可减小转矩波动。

开关磁阻电动机的电压方程可表示为

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \tag{1.8-72}$$

式中： u 是相电压； R 是绕组电阻； ω 是转自转速。相应的相电流可以表示为

$$i = \frac{u}{\omega} f(\theta) \tag{1.8-73}$$

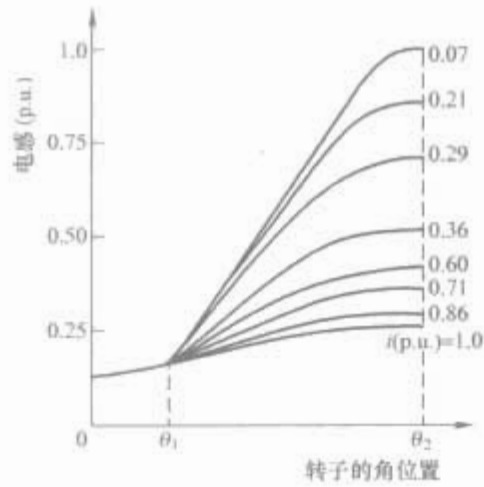


图 1.8-79 非线性电感特性曲线

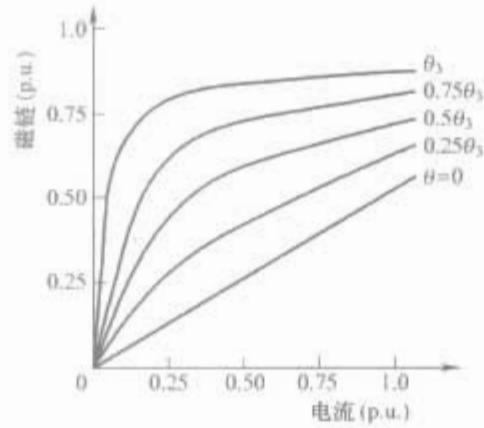


图 1.8-80 非线性磁链特性曲线

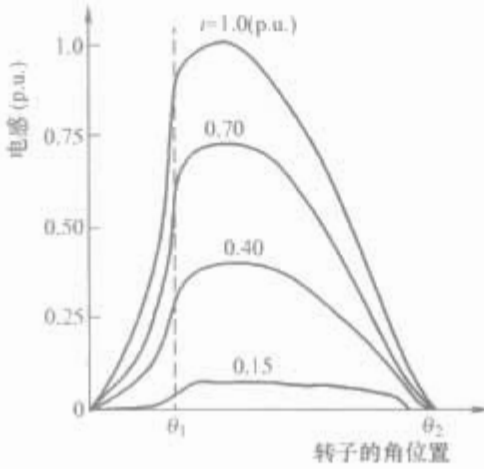


图 1.8-81 非线性转矩特性曲线

式中： $f(\theta)$ 是电动机结构参数、转子位置、触发角和关断角的函数。因此， m 相开关磁阻电动机的平均转矩为

$$T = \frac{m}{\theta_{cy}} \int_0^{\theta_{cy}} \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} d\theta = \frac{m u^2}{2 \theta_{cy} \omega^2} \int_0^{\theta_{cy}} f^2(\theta) \frac{\partial L}{\partial \theta} d\theta \quad (1.8-74)$$

式中： θ_{cy} 是转子极距角。如果开关磁阻电动机的相电压、触发角和关断角给定，则平均转矩和功率为

$$T_{av} = \frac{K}{\omega^2} \quad (1.8-75)$$

$$P = \frac{K}{\omega} \quad (1.8-76)$$

可以看出，开关磁阻电动机的转矩与转速的二次方成反比，功率与转速成反比，这与串励直流电动机的特性类似。

开关磁阻电动机有两个基本工作方式，如图 1.8-82 所示。当转速低于基速 ω_b 时，对电流进行斩波限幅，称为电流斩波控制(CCC)。在 CCC 方式，触发角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 不变，触发角仅由速度反馈决定。通过改变电流限制可以控制转矩，因此用 CCC 可以得到恒转矩特性。在高速区工作，峰值电流受相绕组的感应电动势限制。它的特性可以通过调节不同转子位置所对应的开关相位来控制，称为角位置控制(APC)。在 APC 方式，可以获得恒功率工作特性。在临界

转速 ω_{sc} 、 θ_{on} 和 θ_{off} 达到它们的极限值。随后，开关磁阻电动机不再保持恒功率的工作特性，而进入串励特性区，此时， $\theta_c = \theta_{cy}/2$ (θ_c 是导通角)。CCC 和 APC 方式下电流和电感的典型波形如图 1.8-83 所示。

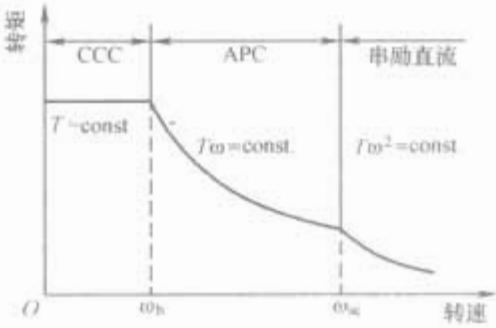


图 1.8-82 典型的转矩/转速特性曲线

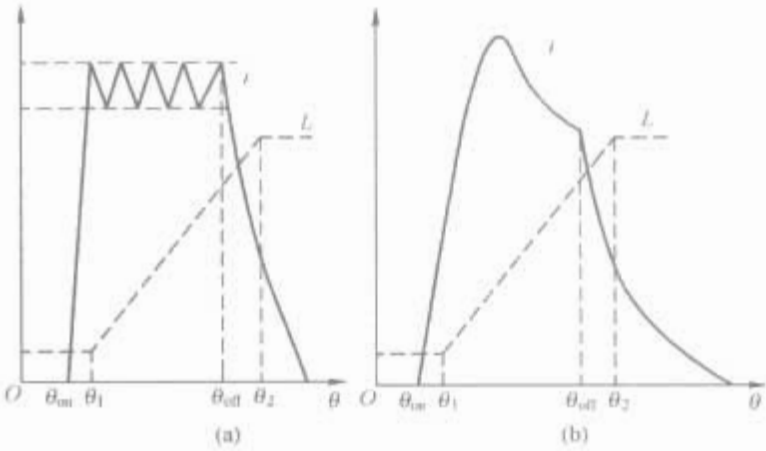


图 1.8-83 在 CCC 和 APC 模式下的电流和电感波形
(a)CCC 模式；(b)APC 模式

与直流驱动电动机类似，为使噪声减小到最小，开关磁阻驱动电动机的斩波频率应高于 10kHz。为减少功率器件的数量，充分利用单极工作，人们开发了很多逆变器电路。但是减少功率器件数目带来许多负面影响，如控制性能变差、可靠性降低、工作性能变差，需要增加额外的无源器件等。图 1.8-84 所示的逆变器电路很适合电动汽车的开关磁阻电动机。它利用两个功率器件分别控制相电流和两个续流二极管，把储存的电磁能量回馈给电动汽车的蓄电池。由于这种电路的拓扑结构每相需要两个功率器件，因此这种逆变器的成本相对高于一个功率器件的逆变器，但是其逆变桥可以控制每相绕组，而且不受其他相绕组状态的影响。因此，可以采用相重叠，使转矩增加，电动汽车驱动的恒功率范围变宽。

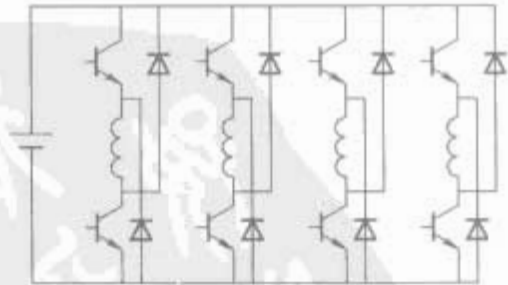


图 1.8-84 开关磁阻驱动电动机的转换器电路图

5.5.2 开关磁阻电动机的设计

由于极端部的高度磁饱和极槽的边缘效应，使得用电磁回路方法设计开关磁阻电动机有很大困难。在大多数情况下，采用电磁有限元分析确定电动机参数和性能。开关磁阻电动机典型的电磁场分布如图 1.8-85 所示。考虑到极弧宽度、极高和最大磁通密度的限制，遵循总损耗最小的原则，对开关磁阻电动机进行优化。不过，初始化用于电动汽车驱动的开关磁阻电动机的设计过程有一些基本准则。

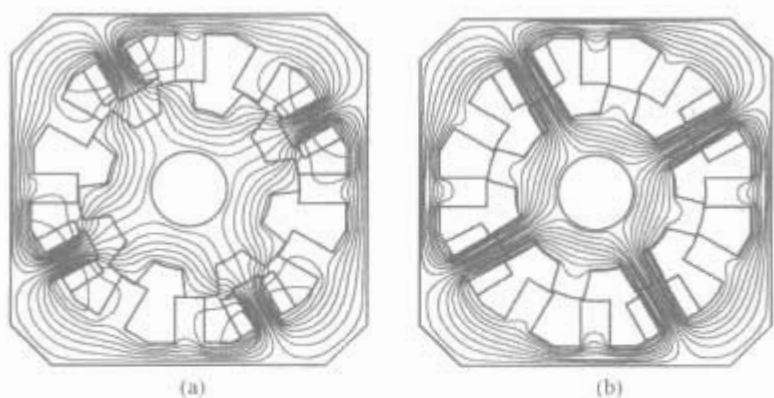


图 1.8-85 开关磁阻电动机的电磁场分布图
(a)定子、转子的磁极错开；(b)定子、转子的磁极相对

5.5.2.1 相数和极数

为了满足电动机的性能，适当选择相数和极数很重要。为了能使开关磁阻电动机正反向起动和运行，它至少应该是三相六定子极四转子极的。在图 1.8-85 所示的开关磁阻电动机结构中，三相 6/4 极开关磁阻电动机的价格最低、效率最高，但是它的大转矩波动使电动汽车的爬坡性能降低。另一方面，四相 8/6 极开关磁阻电动机的价格较昂贵、效率较低，但转矩波动最小，能满足电动汽车爬坡性能的要求。三相 12/8 极开关磁阻电动机是三相 6/4 极和四相 8/6 极开关磁阻电动机的折中方案。它们的选择应基于电动汽车的要求和合理的价格。极数和相数越多，所需要的功率器件就越多，开关频率也越高，从而增加了成本和开关损失。定子和转子的极数，即 p_s 和 p_r 分别为

$$p_s = 2km \tag{1.8-77}$$

$$p_r = 2k(m \pm 1) \tag{1.8-78}$$

式中： m 是相数； k 是正整数。

若转子转速为 $n(\text{r/min})$ ，则每相的换向频率 f_{ph} 为

$$f_{ph} = p_r \frac{n}{60} \tag{1.8-79}$$

为了使开关频率最小化，并减少极部和轭部的铁损，转子极数应尽可能选少一点，因此转子极数一般比定子极数少。

5.5.2.2 极弧

当转子处于磁极错开的位置时，为了使与最小电感 L_{\min} 有关的磁导率最小，并增加转矩重叠，可以根据式(1.8-80)选择开关磁阻电动机的极弧

$$\min(\beta_s, \beta_r) > \frac{2\pi}{mp_r} \tag{1.8-80}$$

式中： β_s 和 β_r 分别是定子和转子的极弧。要选取最适宜的极弧组合，既要考虑最大的电感变化率，又要考虑转矩波动、起动转矩和磁饱和性。

5.5.2.3 定子直径和铁心长度

在设计电动机机座时，有两个重要参数需要优化，即定子内径 D_{si} 和铁心长度 L_c ，它们对电动机材料的体积和质量有重要影响。根据式(1.8-81)和式(1.8-82)进行初步选择

$$D_{si} = (0.5 \sim 0.65)D_{so} \tag{1.8-81}$$

$$L_c = (0.5 \sim 1.0)D_{so} \tag{1.8-82}$$

式中： D_{so} 是定子外径，它的选择与感应电动机类似。

5.5.2.4 气隙长度和转子外径

开关磁阻电动机的小气隙会产生大的电感变化率，使电

动机获得高转矩密度、高效率及要求低的逆变器伏—安特性。但是，气隙越小，加工定子内表面和转子表面就越困难，这样会增加电动机成本。根据经验选择，开关磁阻电动机的气隙长度应该等于或小于同直径感应电动机的气隙长度。当气隙长度选择后，根据式(1.8-83)确定转子外径

$$D_{ro} = D_{si} - 2g_o \tag{1.8-83}$$

式中： g_o 是气隙长度。

5.5.2.5 转子极高

当定子与转子的磁极错开时，相绕组的电感最小，边缘效应的导磁性显著。为了使最小电感时的边缘效应最小，转子极高 h_r 可以根据式(1.8-84)和式(1.8-85)选择

$$h_r \geq 1.1 \left(\frac{\beta_{cy} - \beta_r}{2} \right) \left(\frac{D_{ro}}{2} \right) \tag{1.8-84}$$

$$h_r \leq 0.5(D_{si} - D_{ri}) - g_o - \left(\frac{D_{si}}{2} - g_o \right) \sin \left(\frac{\beta_r}{2} \right) \tag{1.8-85}$$

式中： D_{ri} 是转子内径。

5.5.2.6 定子极高

为了确保定子绕组有足够的空间，定子极高 h_s 一般比转子极高 h_r ，根据式(1.8-86)确定

$$h_s \leq 0.5(D_{so} - D_{si}) - \left(\frac{D_{si}}{2} \right) \sin \left(\frac{\beta_s}{2} \right) \tag{1.8-86}$$

开关磁阻电动机的设计还需要考虑定子每相绕组的匝数、单位磁路的磁通密度、磁极相对未饱和时的每极磁阻、每相的饱和磁通、磁极错开时的每极磁阻、饱和增磁阻、磁动势—磁通特性、转速、转矩和效率、单位热路的热阻抗、单位质量的转矩，以及铜、磁铁心的质量。

5.5.3 开关磁阻电动机的控制

开关磁阻驱动电动机的控制要求独特，因此感应电动机和同步电动机的控制方法不再适用。传统的控制方法，如 PID 控制不适用于电动汽车，所以人们为电动汽车驱动的开关磁阻电动机新开发了一种模糊滑模控制(FSMC)方法，这种方法综合利用了模糊逻辑控制(FLC)和滑模控制(SMC)。

由于 FLC 控制在不使用控制系统数学模型的条件能够下能够将语言控制策略转换为自动控制，所以可用来处理复杂、不能精确定义的系统。但由于模糊控制规则是靠经验决定的，它的隶属函数的选择主要靠试错法，因此 FLC 设计费时，而且受控制系统的动态响应也不能事先确定。

应用 SMC 方法，控制系统对于外来干扰和参数变化具有很强的鲁棒性。因此，可以通过预定状态轨迹的理想滑模面来支配受控系统的动态特性。但由于系统的各种非理想性，如开关磁滞性、控制系统和数字采样的延时等的存在，状态轨迹通常沿非理想滑模面振颤，这种不期望的振颤在控制系统产生高频非模型控制的动态特性。

FSM 方法结合了 FLC 和 SMC 的优点，即用 SMC 克服开关电动机的非线性，而用 FLC 控制振颤。电动汽车开关磁阻电动机的速度控制系统如图 1.8-86 所示，它由两个闭环组成，一个是内部的电流环，另一个是外部的速度环。FSMC 的输入是参考速度 ω^* 与反馈速度 ω 之差，而输出的是参考转矩 T^* 。它的参考电流 i^* 用开关磁阻电动机的非线性转矩—角特性表示。

一套专门为小型电动汽车设计，并采用 FSMC 的三相 4kW 开关磁阻驱动电动机优化的设计参数见表 1.8-24。为评价提出的 FSMC 方法，采用 FSMC 和 SMC 的开关磁阻驱动电动机在 1000r/min 的转矩波形比较如图 1.8-87 所示，结果表明采用 FSMC 转矩波动明显减小。

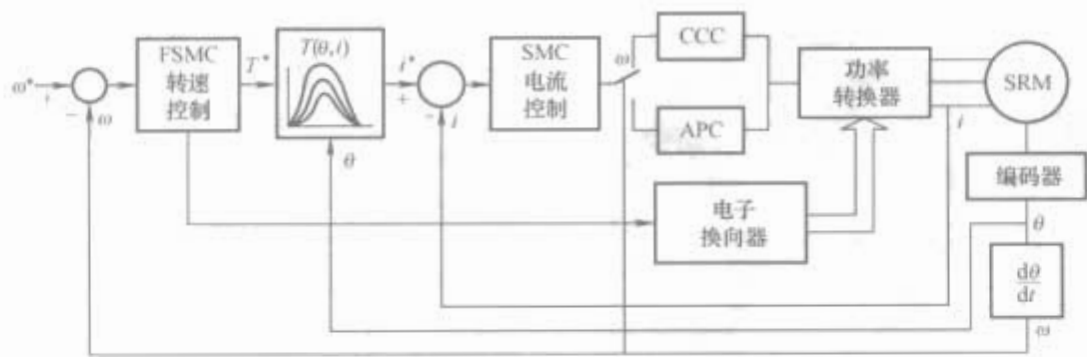


图 1.8-86 开关磁阻电动机的 FSMC 系统

表 1.8-24 某开关磁阻电动机的技术参数

电动机参数		定 子		转 子	
额定功率 (kW)	4	气隙	0.5	外径 (mm)	109
额定电压 (V)	240	外径 (mm)	175	内径 (mm)	38
额定转速 (r/min)	3000	内径 (mm)	110	极高	14
相数	3	铁心长度 (mm)	168	极弧	17.5°
		极高	23		
		极弧	15.5°		

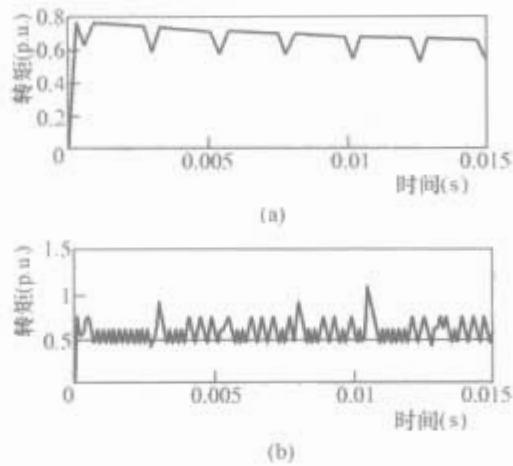


图 1.8-87 FSMC 和 SMC 的波形比较
(a)FSMC; (b)SMC

5.5.4 开关磁阻电动机在电动汽车中的应用

“十五”期间，华中科技大学研制了开关磁阻电动机和控制系统，并应用在 EQ6110 混合动力公交车上。该电动机采用四相 8/6 极结构，铸铝机壳，自然冷却；控制器采用 DSP 作为主控芯片，实现了对开关磁阻电动机的全数字化控制。系统额定电压为直流 336V，额定电动功率为 50kW，峰值为 100kW，发电功率为 50kW，额定转速为 2000r/min。声压级噪声小于或等于 73dB，系统的额定总效率为 88%，并且在很宽的速度范围内具有很高的效率，能方便地实现四象限运行，能在任意转速下实现可控的发电及回馈制动。北京中纺锐力机电有限公司开发的开关磁阻电动机，额定功率为 35kW、最大功率为 60kW、峰值发电功率为 50kW，转速范围为 0~4500r/min，额定电源电压为 336V，系统额定效率大于 88%，驱动控制系统采用 CAN 总线通信方式。通过优化电磁设计和隔噪技术，较好地解决了噪声问题。

6 能量源

电动汽车能量源的主要任务是为驱动控制系统提供电能，电动汽车对能量源的要求是有高的比能量和比功率，满足车辆动力性和续驶里程的要求，还要求能量源具有与车辆使用寿命相当的循环寿命、高效率、良好的性能价格比和免

维护特性。

可用于电动汽车的能量源主要有：可充电的电化学蓄电池(简称蓄电池)、燃料电池、超级电容和超高速飞轮，其中蓄电池是目前和近期电动汽车能量源的主要选择，燃料电池和电容是电动汽车能量源选用的中期目标。从长远来看，飞轮作为电动汽车能量源也将成为可能。

6.1 蓄电池

6.1.1 电特性

6.1.1.1 电压

- (1) 电动势。电池正极和负极之间的电位差 E 。
- (2) 开路电压。电池在开路时的端电压，一般开路电压与电池的电动势近似相等。
- (3) 额定电压。电池在标准规定条件下工作时应达到的电压。
- (4) 工作电压(负载电压、放电电压)。在电池两端接上负载 R 后，在放电过程中显示出的电压，它等于电池的电动势减去放电电流 I 在电池内阻 r 上的电压降

$$U = E - Ir$$

电池的内阻包括电池正、负极板的电阻，电解液的电阻，隔板的电阻和连接导线与端子的电阻等。

- (5) 终止电压。电池在一定标准所规定的放电条件下放电时，电池的电压将逐渐降低，当电池再不宜继续放电时，电池的最低工作电压称为终止电压。当电池的电压下降到终止电压后，再继续使用电池放电，因为受到化学“活性物质”性能的限制，“活性物质”会遭到破坏。

6.1.1.2 电池容量(A·h)

- (1) 理论容量。根据蓄电池的活性物质的特性，按法拉第定律计算出的最高理论值，一般用质量容量 $A \cdot h/kg$ 或体积容量 $A \cdot h/L$ 来表示。
- (2) 实际容量。在一定条件下所能输出的电量，等于放电电流与放电时间的乘积。能力源的容量定义如下

$$CC = \int_0^t i(t) dt$$

能力源的容量采用 $A \cdot h$ 数来表示。

- (3) 标称容量(公称容量)。用来鉴别电池适当的近似安时值，由于是在没有指定的放电条件下，因此，只标明电池的容量范围而没有确切值。
- (4) 额定容量(保证容量)。按一定标准所规定的放电条件下的容量。
- (5) 充电状态(SOC)。充电状态(SOC)是指参加反应电池容量的变化： $SOC=1$ 表示为电池充满状态。当蓄电池放电时，蓄电池的电荷逐渐减少，此时蓄电池的充电状态可以用 SOC 的百分数的相对量来表示蓄电池中电荷数的变化状态。一般蓄电池放电高效率区为(50%~80%)SOC，对 SOC 精确的实时辨识是电池管理系统的一个关键技术。

6.1.1.3 能量

电池能量决定电动汽车的行驶距离。

(1) 标称能量。按一定标准所规定的放电条件下, 电池输出的能量。电池的标称能量是电池的额定容量与额定电压的乘积。

(2) 实际能量。在一定条件下, 电池所能输出的能量。电池的实际能量是电池的实际容量与平均工作电压的乘积, 电池的质量包括电池本身构件质量和电解质质量的总和。能量源的能量 EC 定义如下

$$EC = \int_0^t u(t) i(t) dt$$

式中: $u(t)$ 为工作电压, V; $i(t)$ 为放电电流, A; t 为放电时间, h。

通常以 $W \cdot h$ 来表示能量源能量的单位。

(3) 能量密度。能量密度是指单位质量或单位体积的蓄电池所具有的能量。质量能量密度定义为蓄电池的比能量 ($W \cdot h/kg$), 体积能量密度定义为蓄电池的能量密度 ($W \cdot h/L$)。

(4) 比能量(国际单位为比能 J/kg , 换算 $1W \cdot h/kg = 3600J/kg$)。动力电池组的比能量是指动力电池组单位质量中所能输出的能量。动力电池组的实际比能量的计算模型如下

$$N_{bi} = CU_i/m$$

式中: C 为按额定电流放电时的实际放电容量, $A \cdot h$; U_i 为放电过程的平均电压, V; m 为单节电池的质量(包括电解液), kg。

动力电池组的能量密度是指动力池组单位体积中能输出的能量。动力电池组的实际能量密度的计算模型如下

$$nU_{bw} = n(CU_i/V)$$

式中: n 为动力电池组串、并联的电池数目, 节; C 为按额定电流放电时的实际放电容量, $A \cdot h$; U_i 为放电过程中的平均电压, V; V 为单节电池的体积, L。

蓄电池的质量比能量指标比体积比能量指标更为重要, 因为蓄电池质量比能量影响电动汽车的整车质量和续驶里程, 而体积比能量只影响到蓄电池的布置空间。质量比能量是评价电动汽车的能量源是否能满足预定的续驶单程的重要指标。既然蓄电池的可利用容量是蓄电池充放电率的函数, 那么蓄电池比能量和能量密度的定义也与蓄电池的充放电率有关。

6.1.1.4 功率

能量源的功率密度是指单位质量或单位体积的蓄电池所具有的输出功率的速率, 称为比功率[对应质量比功率(W/kg)和功率密度(W/L)]。

(1) 比功率(W/kg)。电池的比功率是指电池单位质量中所具有的电能功率。

(2) 功率密度(W/L)。电池的功率密度是指电池单位体积中所具有的电能功率。

对电动汽车而言, 重点考虑比功率参数。比功率是评价能量源能否满足电动汽车加速和爬坡能力的重要指标, 与电化学蓄电池、比功率与蓄电池的放电深度 DOD 密切相关, 因此, 在表示蓄电池比功率时, 还要指出蓄电池的 DOD。

6.1.1.5 电池的内阻

电流通过电池内部时受到的阻力, 使电池的电压降低, 此阻力称为电池的内阻。由于电池的内阻作用, 使得电池在放电时, 端电压低于电动势和开路电压。在充电时, 充电的端电压高于电动势和开路电压。

6.1.1.6 放电速率(放电率)

一般用电池在放电时的时间或放电电流与额定电流的比例来表示。

(1) 时率。电池以某种电流强度放电, 直到电池的电压降低到终止电压时所经过的放电时间。

(2) 倍率。电池以某种电流强度放电的数值为额定容量数值的倍数。

(3) 自放电率。电池在存放时间内, 在没有负荷的条件下自身放电, 使得电池的容量损失的速度, 自放电率用单位时间(月/年)内电池容量下降的百分数来表示

$$\text{自放电率} = (Ah_a - Ah_b) / Ah_a \times t$$

式中: Ah_a 为电池储存时的容量, $A \cdot h$; Ah_b 为电池储存若干小时以后的容量, $A \cdot h$; t 为电池储存的时间, 天或月。

6.1.1.7 循环寿命

能量源失效前所允许的深放电次数, 循环寿命是基于能量存储原理评价电动汽车能量源使用寿命的重要参数, 既然循环寿命受蓄电池 DOD 影响, 那么循环寿命的表示还要同时指出放电深度 DOD。

寿命是指能量源的使用时间, 以 h 或是 1000h 为计量单位。电动汽车能量源的寿命是基于能量产生原理来评价计算的。

6.1.1.8 工作效率

电动汽车能量源的工作效率通常定义为输出能量与输入能量的百分比。对能量存储装置来说, 能量效率表示为放电过程的输出电能与充电过程的输入电能的百分比。通常, 蓄电池的能量效率为 55%~75%。值得指出的是, 能量效率不同于电量效率, 电量效率实际定义为蓄电池放电 Ah 数与充电 Ah 数的百分比, 而蓄电池的电量效率通常为 65%~90%。对电动汽车而言, 能量效率是比电量效率更重要的一个评价指标。

6.1.1.9 成本

成本是电动汽车能量源的一个敏感性指标, 正是因为成本问题, 使电动汽车不能与燃油车竞争。电动汽车能量源的成本包括两个方面的内容, 即初始的生产成本和使用过程中的维护使用成本计量, 单位为美元/(kW·h), 其中, 初始成本具有决定意义。

6.1.2 蓄电池的分类

6.1.2.1 铅酸电池

电动汽车中使用的铅酸电池与普通的铅酸电池有所不同, 用于电动汽车作为能量源的铅酸电池必须是动力型铅酸电池, 其能量密度和比能量相对普通铅酸电池要高, 应用在大电流充放电的场合。铅酸电池具有许多显著的优点: 技术可靠, 生产工艺成熟, 成本低(低于所有其他的二次电池), 单体电池电压高(高于所有其他液体电解液电池), 适合电动汽车使用的良好的大电流输出性能; 良好的高温和低温性能, 高的能量效率(75%~80%), 以及多种多样的型号和尺寸。但是铅酸电池的比能量和能量密度都较低(通常为 $35W \cdot h/kg$ 和 $70W \cdot h/L$), 自放电率较高。每天降低 1% (在环境温度为 25℃ 条件下), 循环寿命相对较低(约为 500 次)。

普通铅酸蓄电池在使用过程中需要经常加水、补酸, 而且还会产生腐蚀性气体, 污染环境, 损伤人体和设备。近年来, 许多先进国家已经禁止生产和销售。普通铅酸蓄电池由于硫酸腐蚀电极, 不便于长期储存等, 所以性能得到改进的多种类型的铅酸电池正不断地被应用到电动汽车上。阀控铅酸蓄电池(VRLA 电池)具有密封好、无泄漏、无污染等特

点，能够保证人体和各种用电设备的安全，而且无需任何维护，从而揭开了铅酸蓄电池发展历史新的一页。VRLA 电池的比能量已超过 $40\text{W}\cdot\text{h/kg}$ ，能量密度超过 $80\text{W}\cdot\text{h/L}$ ，并且可以实现快速充电。VRLA 电池的典型代表为 Electro-source 公司的 Horizon 电池。Horizon 电池采用了铅丝编制的水平极板，性能得到极大提高，比能量达到 $43\text{W}\cdot\text{h/kg}$ ，能量密度达到 $84\text{W}\cdot\text{h/L}$ ，比功率达到 285W/kg ，应用到电动汽车上的循环寿命超过 800 次，快速充电能力得到极大提高(8min 充电 50%，充满电只需不到 30min)，成本低廉(一辆电动汽车的电池成本仅为 2000~3000 美元)，机械强度高，免维护及环保观念设计(绿色生产过程和 98% 的可回收材质)。其他先进铅酸电池设计还包括双极设计和微管状极板设计。

(1) 阀控铅酸电池的基本结构。阀控铅酸电池的基本结构如图 1.8-88 所示，它由正极板、负极板、隔板、电解液、安全阀、气塞、外壳等部分组成。正、负极板均采用涂浆式极板，活性材料涂在特制的铅钙合金骨架上。这种极板具有很强的耐酸性，很好的导电性和较长的寿命，自放电速率也较小。隔板采用超细玻璃纤维制成，全部电解液注入极板和隔板中。电池内没有流动的电解液，即使外壳破裂，电池也能正常工作。电池顶部装有安全阀，当电池内部气压升高到一定数值时，安全阀自动开启，排出多余气体；当电池内的气压低于一定数值时，安全阀自动关闭。顶盖上还备有内装防爆陶瓷过滤器的气塞，可以防止酸雾从蓄电池中逸出。正、负极接线端子用铅合金制成，采用全密封结构，并用沥青封口。阀控铅酸电池使用中，内壁承受较大的压力，采用防透气和防渗水性能优良的 PVC 材料可以减少从外壳慢性失水的途径，同时外壳的厚度可以减小，有利于电池内部的热量向外扩散。阀控铅酸电池的壳盖采用特殊的凹槽结构，以使壳盖吻合紧密，并采用超声波封焊，外部再粘环氧胶。经过三重防漏措施处理后，外壳和壳盖之间不会出现酸液泄漏现象。

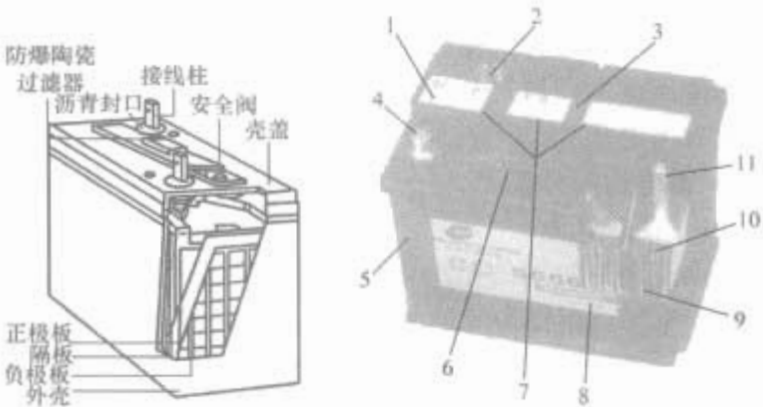


图 1.8-88 阀控铅酸电池的结构

1—滤气排气孔；2—电池状态显示计(电眼)；3—迷宫气体通道；4—端子；5—壳体；6—提手；7—提示及说明；8—汇流排；9—PE 袋式隔板；10—极板；11—极柱

在阀控铅酸电池中，电解液全部吸附在隔板和极板中，负极活性物质(海绵状铅)在潮湿条件下活性很高，能与氧气快速反应。充电过程中，正极板产生的氧气通过隔板扩散到负极板，与负极活性物质快速反应，化合成水。因此，在整个使用过程中，不需要给蓄电池加水和补酸。

关于铅酸电池基本工作原理，在第 2 章汽车电源与启动机已有论述，请读者参考。

目前，铅酸电池仍然是电动汽车最具吸引力的能量源选择方案，除了美国 Electro source 公司，生产 VRLA 电池的

厂家还有意大利 CS、英国霍克(Hawker)电池集团、美国江森自控(Johnson controls)有限公司、日本松下(Panasonic)电器有限公司、德国阳光(Sonnenschein)电池有限公司、美国木马(Trojan)电池厂和日本汤浅(YUASA)株式会社等多家公司。

(2) 铅酸电池的特性及充放电特性。

1) 阀控铅酸电池充电特性如图 1.8-89 所示。

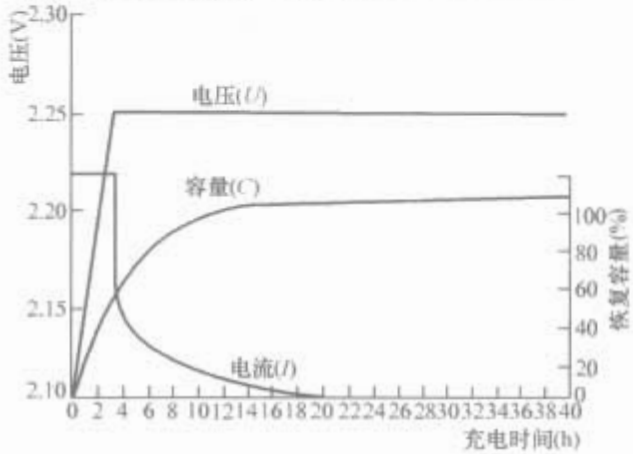


图 1.8-89 阀控铅酸蓄电池充电特性曲线

2) 放电特性。当采用各种不同放电速率时，阀控铅酸电池的放电特性曲线如图 1.8-90 所示。

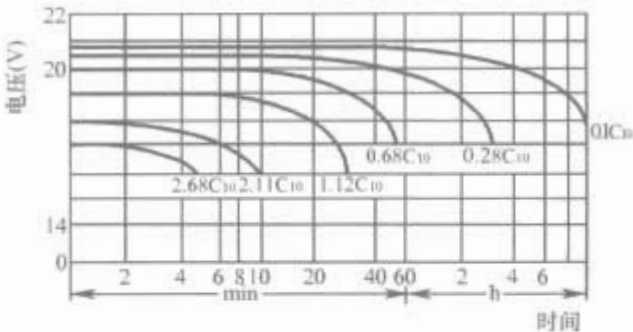


图 1.8-90 阀控铅酸电池放电特性曲线

通常阀控电池的放电速率为 $0.02C_{10}$ 、 $0.1C_{10}$ 、 $0.2C_{10}$ 或 $0.3C_{10}$ (C_{10} 为蓄电池 10h 率放电容量)。在阀控电池应用过程中，应当尽可能避免放电速率过小。

环境温度对阀控电池放电特性的影响很大。当采用 $0.1C_{10}$ 放电速率时，在不同环境温度下，放电特性曲线如图 1.8-91 所示。

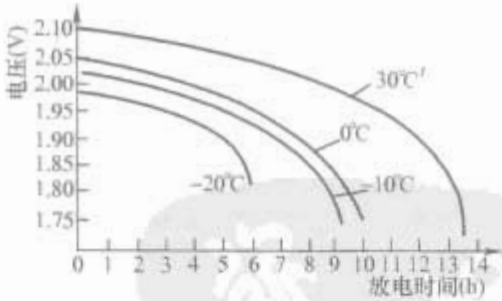


图 1.8-91 环境温度对阀控电池放电特性的影响

由图 1.8-91 可以看出，随着环境温度的降低，蓄电池能放出的电量将减小。当环境温度为 -20°C 时，阀控电池仍可以放出 60%~70% 的电量。当阀控电池充足电时，电解液的冰点为 -70°C ；放完电后，电解液的冰点为 -5°C 。为了保证化学反应充分进行，铅酸电池的最低温度最好在 -20°C 以上。

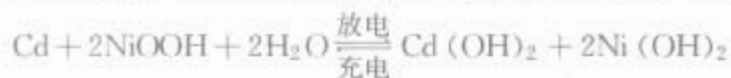
6.1.2.2 镍基电池

有许多电化学电池都采用氧化镍作正极，比如镍-镉、镍-锌和镍-氢电池，其中 Ni-Cd 电池技术可靠、性能良好，在电动汽车上得到了应用。镍-氢电池发展迅速，有望在近期电动汽车市场上取代镍-镉电池。另外，镍-锌电池技术也

得到不断发展,有望在中期电动汽车市场上与其他电池相媲美。

(1) 镍-镉电池。镍-镉电池成功用于重型工业领域已经有 80 多年的历史,它得益于 20 世纪 70 年代末,80 年代初电动汽车行业的复苏,那时镍-镉电池开始应用于电动汽车。镍-镉电池额定电压为 1.2V、比能量 56W·h/kg、能量密度 110W·h/L、比功率 225W/kg。

1) 镍-镉电池工作原理。活性材料为负极的金属 Cd 和正极的氧化镍,电解液为碱性 KOH 溶液。电池化学反应为



放电时,负极金属镉被氧化成氢氧化镉;正极上的氧化镍被还原成氢氧化镍,并消耗水。充电时,反应过程相反。与铅酸电池使用的硫酸电解液相比,镍-镉电池的氢氧化钾碱性电解液在电池充放电过程中,浓度不发生显著变化。

镍-镉电池具有的显著优点使得镍-镉电池技术占有重要地位。其中镍-镉电池比功率高于 220W/kg,循环使用寿命高达 2000 次,抗电流冲击能力强,机械强度高,在相当大的放电电流范围内都只有比较平滑的电压曲线,良好的快速充电能力(18min 内达电池容量的 40%~80%),较宽的工作温度范围[(-4~85)℃],自放电率小(0.5%/天),优越的长期使用能力(电解液对电极的腐蚀作用可以忽略),以及较宽的尺寸和容量选择范围等。当然,镍-镉电池具有的一些缺点限制了它在电动汽车上的广泛使用,比如,镍-镉电池高的生产成本(为铅酸电池的 2~4 倍),相对较低的电池电压,以及金属镉具有致癌性等。

2) 镍-镉电池构造。图 1.8-92 所示为镍-镉电池构造。镍-镉电池的每个单体电池都是由正极板、负极板和装在正极板和负极板之间的隔板组成。将单体电池按不同的组合装置在不同的塑料外壳中,可以得到所需要的不同电压和不同容量的镍-镉电池总成。在市场上有多种不同型号规格的电池总成可供选择。在灌装电解液,并经过充电后,就可以从电池的接线柱上引出电流。

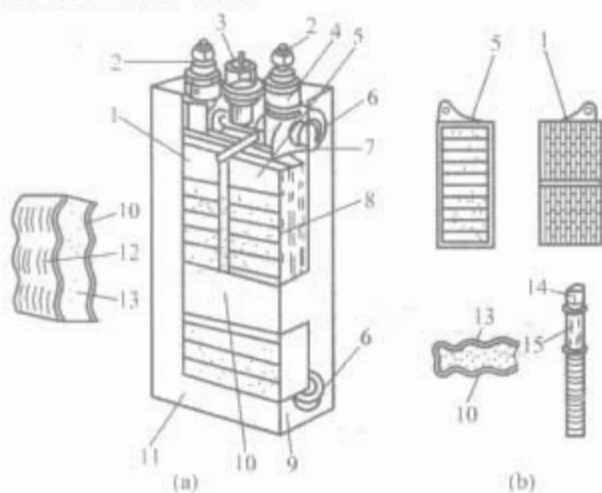


图 1.8-92 镍-镉电池的构造

(a) 镍-镉电池的外形; (b) 镍-镉电池的结构

1—正极板; 2—接线柱; 3—加液口盖; 4—绝缘导管; 5—负极板; 6—吊架; 7—单格电池连接条; 8—极板骨架; 9—绝缘层; 10—镀镍薄钢板; 11—外壳; 12—通孔; 13—活性物质; 14—正极板导管; 15—氢氧化镍

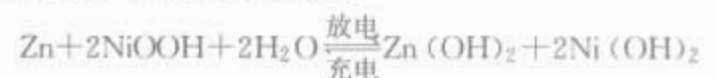
镍-镉电池具有两种主要的类型,即外口型和密封型。开口型电池有多种型号。烧结式开口电池是最近出现的一种新型镍-镉电池,比能量得到了提高,但价格昂贵。它的显著特点是平坦的放电曲线,较高的放电率和良好的低温性能。与密封铅酸电池相似,密封镍-镉电池采用了特别的电池单体设计,避免了电池过充电冒气形成的电池内部压力,

所以该种电池无需定期维护,但具有记忆性。

电动汽车用镍-镉电池的主要生产厂家为法国萨福得(SAFT)公司和德国瓦耳塔(VARTA)电池有限公司。目前克莱斯勒 TE Van、雪铁龙 AX、马自达 Roadster、三菱电动汽车、标志 106、雷诺 Clio 和香港大学 U2001 等电动汽车使用了镍-镉电池。目前,镍-氢电池是镍-镉电池强有力的竞争对手。

(2) 镍-锌电池。早在 20 世纪 30 年代,镍-锌电池技术就出现了。锌电极有限的使用寿命限制了镍-锌电池的商业应用。比能量高和材料成本低,若能提高电池的循环寿命,镍-锌电池将具有很好的商业使用价值。

镍-锌电池的额定工作电压为 1.6V,比能量为 60W·h/kg,能量密度为 120W·h/L,比功率为 300W/kg,镍-锌电池用锌作负极,NiOOH 作正极,电解液为碱性 KOH 溶液。电化学反应式为



放电时,负极的金属锌被氧化生成氢氧化锌,同时正极的 NiOOH 被还原生成氢氧化镍。充电反应相反。

与其他镍基电池相比,镍-锌电池具有比能量大、比功率高、电池单体电压高、设计成本低[低于镍-镉电池,100~300 美元/(kW·h)],无毒化性,允许过充电和深度放电,可以以大的放电率充/放电,工作温度范围宽(-20~60℃)等优点。镍-锌电池的致命弱点是循环寿命短(大约仅为 300 次),这主要是由于锌部分溶于电解液,而电解液中的锌不能在同一位置以相同的形态得到分解和沉积,锌电极形态的变化导致电池容量衰退。当前科研人员努力发展了电极、隔板和电解液技术,使电池循环寿命得以着重提高,从而使 Ni-Zn 电池技术出现了新的生机。

目的,镍-锌电池的研发主要针对电动代车的使用。YUASA 和 Kyushu 电源公司联合开发了用于电动汽车的镍-锌电池模块。出三个电池模块串联组成的镍-锌电池系统安装在电动摩托车/助动车上,性能指标达到比能量 65W·h/kg、比功率 150W/kg,以及 20km 的市区行驶里程。

(3) 镍-氢电池。镍-氢电池也是一种碱性电池,镍-氢电池的标称电压为 1.2V,比能量可达到 70~80W·h/kg,有利于延长电动汽车的行驶里程;比功率可达到 200W/kg,是铅酸电池的两倍,能够提高车辆的起动性能和加速性能。有高倍率的放电特性,短时间可以以 3C 放电,瞬时脉冲放电率很大。镍-氢电池的过充电和过放电性能好,能够带电充电,并可以快速充电,在 15min 内可充 60% 的容量,1h 内可以完全充满,应急补充充电的时间短。在 80% 的放电深度下,循环寿命可达到 1000 次以上,是铅酸电池的 3 倍。采用全封闭外壳,可以在真空环境下正常工作。低温性能较好,能够长时间存放。镍-氢电池没有 Pb 和 Cd 等重金属,不会对环境造成污染。镍-氢电池可以随充随放,不会出现镍-镉电池在没有放完电后即充电而产生的“记忆效应”。但在高温条件下使用时,电荷量急剧下降,自放电损耗较大,价格较贵,镍-氢电池的比功率和放电能力不及镍-镉电池。镍-氢电池在使用时还应充分注意各个单体电池之间的一致性(均匀性),特别是在高速率、深放电情况下,各个单体电池之间的容量和电压差比较明显。注重对电池组在充、放电过程中的导热管理和电池安全装置的设计。

镍-氢电池用于电动汽车上主要优点是:起功加速性能好,一次充电后的行驶里程较长,不会对周围环境造成污

染，易维护，快速补充充电时间短。Ni-MH 电池被认为满足电动汽车使用的近期目标。相当多的电池生产厂家，比如美国通用—奥汪力(GM Ovonic)、超霸(GP)、统一(GS)、松下(Panasonic)、法国帅福得(SAFT)公司、德国瓦尔塔(VARTA)电池有限公司和日本汤浅(YUASA)株式会社等都致力于电动汽车用 Ni-MH 电池技术的开发。比如，GP 公司的镍—氢电池比能量达 $70\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 、能量密度达 $170\text{W}\cdot\text{h}/\text{L}$ 、比功率达 $180\text{W}/\text{kg}$ 。在 1993 年，奥汪力(Ovonic)电池公司把镍—氢电池装在 solectria GT Force 电动汽车上用于试验测试和技术演示。19kW·h 的 Ni-MH 电池比能量为 $65\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 能量密度为 $175\text{W}\cdot\text{h}/\text{L}$ ，比功率为 $150\text{W}/\text{kg}$ ，使得电动汽车最高车速达到 $134\text{km}/\text{h}$ ， $0\sim 80\text{km}/\text{h}$ 的加速时间为 14s，市区续航里程 206km。

1) 密封镍—氢电池的组成材料。密封镍—氢电池与其他蓄电池一样，都是由正极板、负极板、电解质和隔膜等组成的。

① 正极板：涂覆式镍—氢电池正极板采用的活性物质为氢氧化镍 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 。结晶完好的 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 由层状结构的单元晶胞组成，每个晶胞中含有一个镍原子、两个氧原子和两个氢原子。

在 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 制备过程中，添加一定数量的钴(Co)可以增加氢氧化镍化学反应的可逆性，改善其导电性能。但钴的添加量过大，电池的自放电率将增加。

氢氧化镍中的杂质主要有钙、镁、铁等。钙、镁含量过大会降低氢氧化镍的活性电池的寿命，铁化合物的含量过高，电池的自放电电流增大。

② 负极板：镍—氢电池的负极板都采用贮氢合金制造。 AB_2 型贮氢合金具有贮氢容量大，循环寿命长等优点，是目前贮氢合金研究的热点，但这种材料高倍率放电性能较差，原材料价格也偏高。 A_2B 型镁基贮氢合金具有贮氢量大，资源丰富，价格低廉等优点，但是容量衰减较快，循环寿命较短。目前，国内外镍—氢电池负极材料都是 AB_5 稀土镍系贮氢合金，这种合金具有很高的电化学贮包容量，但在充放电循环过程中，容量衰减较快。

③ 电解质和阳膜：镍—氢电池中的电解质一般都采用氢氧化钾(KOH)水溶液，并且加入少量的 LiOH ；膜采用多孔维尼纶无纺布或尼龙无纺布。

2) 密封镍—氢电池基本工作原理。镍—氢电池的正极材料为 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ，负极材料为贮氢合金(用 M 表示)，电解质为氢氧化钾，电解质是水溶性氢氧化钾和氢氧化锂的混合物。在电池充电过程中，水在电解质溶液中分解为氢离子和氢氧离子，氢离子被负极吸收，负极从金属转化为金属氢化物；在电池放电过程中，氢离子离开了负极，氢氧离子离开了正极，氢离子和氢氧离子在电解质氢氧化钾中结合成水并释放电能，充放电原理如图 1.8-93 所示。



3) 密封镍—氢电池的结构。密封镍—氢电池按形状可以

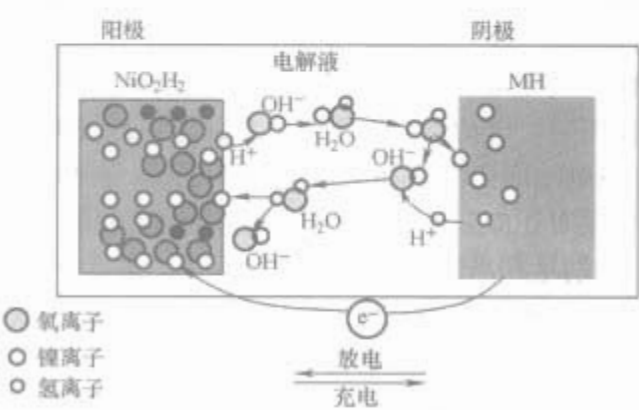


图 1.8-93 密封镍—氢电池充放电原理图

分为圆柱形、方形电池等。按正极制造工艺，可分为烧结式和泡沫式两大类型。圆柱形镍—氢电池的内部结构如图 1.8-94 所示，其内部主要由正极板、负极板、正极集电体、正极接线柱(内藏排气阀)、负极接线柱(电池壳)、绝缘膜等部分组成。当镍—氢电池过充电时，壳内的气体压力逐渐上升，该压力达到一定数值后，正极接线柱的排气阀打开，这样可避免镍—氢电池因内部压力过大而爆炸。方形镍—氢电池的结构如图 1.8-95 所示。

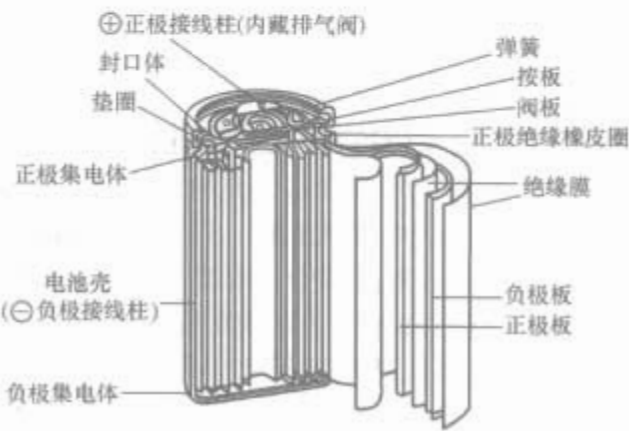


图 1.8-94 圆柱形镍—氢电池的结构

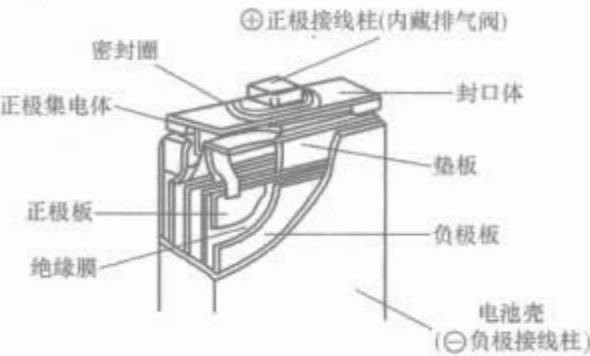


图 1.8-95 方形镍—氢电池的结构

4) 密封镍—氢电池的主要特性。

① 充电特性：在常温(25℃)下采用 1C_{10} 、 0.1C_{10} 或 0.5C_{10} 恒定充电速率充电时，镍—氢电池的电压如图 1.8-96 所示。充电初期，电池电压随充电量(%)的增加而逐渐上升，电池充足电(充电量达到 100%)后，电池电压达到最大值。开始过充电时，若充电率较小，电池电压基本保持不变；当充电速率较大时，电池电压将出现较小的负增量。

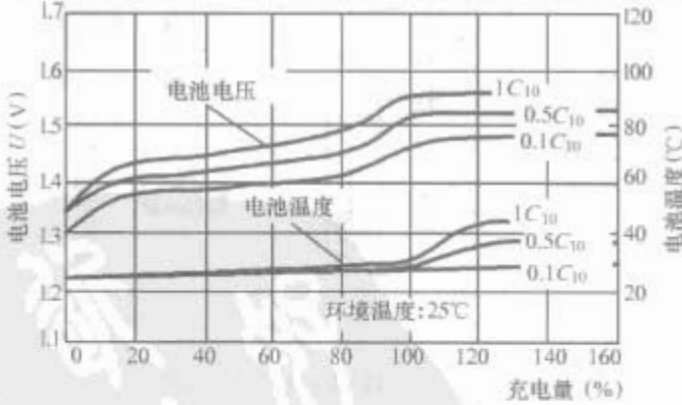


图 1.8-96 镍—氢电池的充电特性

镍—氢电池充足电(充电量达到 100%)后，当充电速率较大时，电池的温度将迅速上升，温度变化率不大。因此，可将温度变化率 dT/dz 和电压负增量($-\Delta U$)作为判定镍—氢电池快速充电终止的标准。

② 温度特性：镍—氢电池采用 1C_{10} 的速率充电，充电 3h 后，电压负增量 $-\Delta U=10\text{mV}$ ，停止充电，然后以 1C_{10} 速率放电，放电终止电压为 1V。

在不同环境温度下，采用上述充放电循环参数时，镍—氢电池的温度特性如图 1.8-97 所示。可以看出，当环境温

度为 20℃ 时，镍-氢电池放电特性最佳；当低温时，贮氢合金的活性降低；当温度升高时，贮氢合金由于分解而析出 H_2 ，致使镍-氢电池的放电容量显著下降，甚至不能工作。

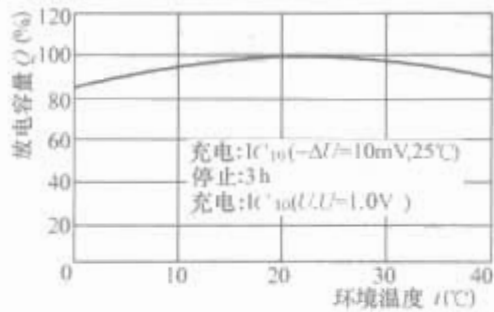


图 1.8-97 镍-氢电池的温度特性

③ 放电特性：镍-氢电池以 $0.1C_{10}$ 速率充电 16h 后，在环境温度为 25℃ 时，以不同速率放电，电池放电电压与放电容量的关系如图 1.8-98 所示。当采用 $0.2C_{10}$ 放电速率，电池电压下降到 1.2V 时，镍-氢电池已放出额定容量的 90%；当电池电压下降到放电终止电压 1.0V 时，镍-氢电池可以放出额定容量；当采用 $1C_{10}$ 放电速率，电池电压下降到 1V 时，也可以放出电池额定容量的 90% 以上。

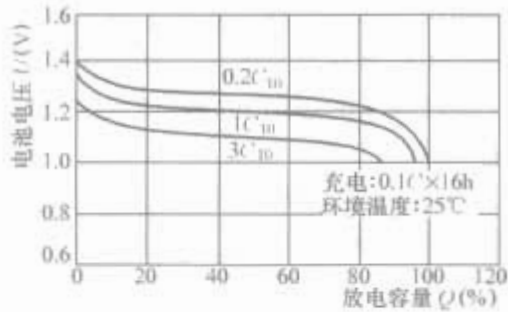


图 1.8-98 镍-氢电池的放电特性

④ 寿命特性：环境温度为 25℃，采用充电速率 $1C_{10}$ 充电，当镍-氢电池电压负增量 $-\Delta U = 10mV$ 时，停止充电。停放 1h 后，再以 $1C_{10}$ 放电速度放电，当电池电压下降到 1V 时，停止放电。放置 14h 后，再以 $1C_{10}$ 速率充电，重复上述过程，可以作出镍-氢电池放电容量与循环次数的关系（即寿命特性）曲线（如图 1.8-99 所示）。

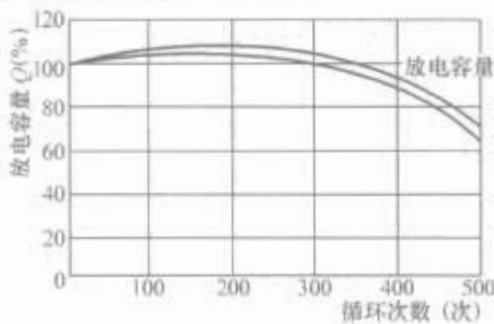


图 1.8-99 镍-氢电池放电容量与循环次数的关系曲线

由图 1.8-99 可以看出，循环次数达到 300 次以前，镍-氢电池的放电容量一般大于额定容量；循环次数达到 500 次以前，镍-氢电池的放电容量也都大于额定容量的 70%。

6.1.2.3 锂离子电池

自从 1991 年首次宣布锂离子电池以来，Li-Ion 电池技术得到了空前地发展。如图 1.8-100 所示，锂离子电池比其他电池有个更高的比能量和比功率密度，成为极具发展潜力的可充电电池。在电动汽车上使用锂离子电池已获得广泛接受。

锂离子电池的优点为高的电池单体电压，高的比能量和能量密度 ($90 \sim 130W \cdot h/kg$, $140 \sim 200W \cdot h/L$)，非常可靠的设计（没有使用金属锂），以及长的循环寿命（约 1000 次）；没有记忆效应，安全性高，环保性好。缺点是自放电率高的

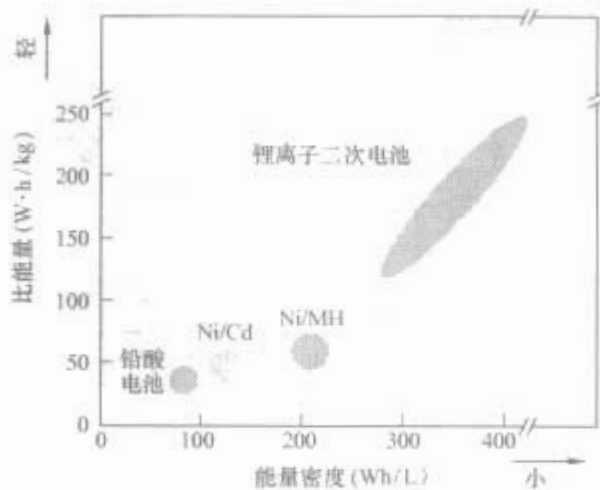


图 1.8-100 各种电池能量密度对比

缺点(10%/月)，快速充、放电的性能较差，需要进一步解决对其充放电过程的控制和配备专用的充电器。对于大容量锂离子电池组，还需要解决电池组的可靠性和各个单体电池之间的一致性。钴系锂离子电池在过充电状态时会引起电池爆炸，需要用安全阀，以防止电解液受高温汽化后产生的压力升高。并安装自动温度调控装置，进行过充、放电的保护。锂的制取较困难，管理和使用比较复杂，要求有严格的安全措施，需要配备电子保护电路、电池管理系统和热管理系统等，使得其附属装置更复杂，也增加厂电池组的造价，价格高于同等容量的镍-镉电池或镍-氢电池。一般来说，锂离子电池分为液态锂离子电池 (LIB) 和聚合物锂离子电池 (PLIB) 两种。

(1) 锂离子电池的工作原理。图 1.8-101 是典型锂电子电池的体系， $LiC_6 \parallel LiPF_6 - EC + DEC \parallel LiCoO_2$ 。锂离子电池实际上是一种锂离子浓差电池，正、负电极由两种不同的锂离子嵌入化合物组成。充电时， Li^+ 从正极脱嵌经过电解质嵌入负极，负极处于富锂态，正极处于贫锂态，同时电子的补偿电荷从外电路供给到碳负极，保证负极的电荷平衡。放电时则相反， Li^+ 从负极脱嵌，经过电解质嵌入正极，正极处于富锂态。在正常充放电情况下，锂离子在层状结构的碳材料和层状结构氧化物的层间嵌入和脱出，一般只引起层面间距变化，不破坏晶体结构，在无放电过程中，负极材料的化学结构基本不变，如图 1.8-102 所示。因此，从充放电反应的可逆性看，锂离子电池反应是一种理想的可逆反应。

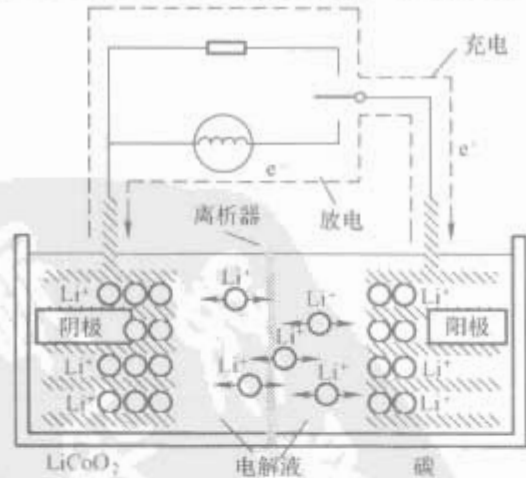


图 1.8-101 典型锂电子电池的体系

(2) 正极材料的结构和性能。具有高插入电位层状结构的过渡金属氧化物 $LiCoO_2$ 、 $LiNiO_2$ 和尖晶石结构的 $LiMn_2O_4$ 是目前已应用的性能较好的正极材料。这些正极的插锂电位都可达 4V 以上，如图 1.8-103 所示。

采用 $LiCoO_2$ 作正极的锂离子电池具有开路电压高，比能量大，循环寿命长，能快速充放电等特点，因此在商品化的锂离子电池中被广泛应用。 $LiNiO_2$ 的价格低廉，性能与

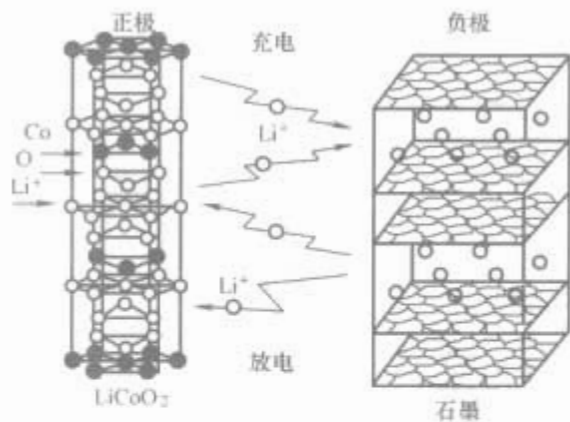


图 1.8-102 锂离子电池充放电示意图

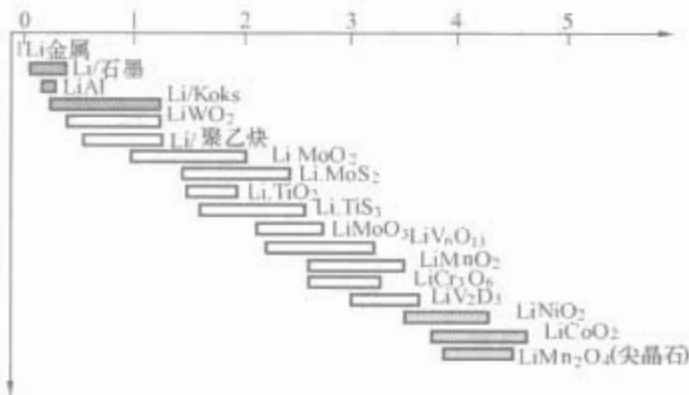


图 1.8-103 不同正极材料电极电位

LiCoO₂ 相当，但是 LiNiO₂ 制备较为困难，目前尚未广泛应用。LiMn₂O₄ 比 LiNiO₂ 和 LiCoO₂ 的价格更低，制备也比 LiNiO₂ 容易得多，但是 LiMn₂O₄ 的可充电容量比 LiCoO₂ 和 LiNiO₂ 要低一些，通常只有 100mA·h/g (LiCoO₂ 的可充电容量为 130mA·h/g，LiNiO₂ 的可充电容量可超过 170mA·h/g)。

以上三种正极材料各自具有特点，LiCoO₂ 制备技术比较成熟，LiNiO₂ 正在逐步替代 LiCoO₂，而 LiMn₂O₄ 正处于研究开发之中。从应用前景看，价格低廉的 LiMn₂O₄ 最具有优势，三种材料的主要性能比较见表 1.8-25。

表 1.8-25 LiCoO₂、LiNiO₂ 和 LiMn₂O₄ 三种材料的主要性能比较

材料名称	理论比容量 (mA·h/g)	实际比容量 (mA·h/g)	密度 (g/cm ³)	价格比	特点
LiCoO ₂	275	130~140	5.00	3	性能稳定，体积比容量高，放电平台稳定
LiNiO ₂	274	170~180	4.78	2	高比容量，热稳定性较差，价格较低
LiMn ₂ O ₄	148	100~120	4.28	1	低成本，比容量较低，高温循环和存放性能差，安全性好

(3) 负极材料结构和性能。典型的碳负极材料分为石墨，焦炭、软碳和硬碳四类，如图 1.8-104 所示。目前，在锂离子电池中，天然石墨和焦炭是应用最广的两类碳负极材料。从它们的结构分析可知，石墨是最容易获得理论容量的碳素材料；焦炭在某些溶剂中则具有优异的循环寿命，是最

有前途的碳素负极材料。



图 1.8-104 典型碳负极材料 (a)石墨；(b)软碳；(c)硬碳

1) 石墨。石墨具有层状结构，同一碳层的碳原子呈等边六角形排列，层与层之间靠范德瓦耳兹力结合，层间距离约为 0.3354nm。通常石墨具有六面体石墨和菱面体石墨两种晶体结构。石墨包括人工石墨和天然石墨两大类。人工石墨又称中间相碳微球(MCMB)、石墨纤维，它是将易石墨化炭(如沥青焦炭)在 N₂ 气氛中于 1900~2800℃ 经高温石墨化处理制得的。在制备过程中，热处理温度是关键参数，影响可逆容量。天然石墨分为无定形石墨和鳞片石墨两种。

2) 焦炭。焦炭是一种乱层石墨结构的碳素材料，各层平面的堆积不如石墨那样有序。各层平面上存在空穴、位错等各种缺陷，层间距离在 0.336~0.344nm 之间。对焦炭进行热处理时，随着温度的逐渐升高，焦炭的结构会逐渐向石墨的结构转化。

3) 软碳。软碳包括石油焦、针状焦、碳纤维、碳微球等。软碳材料存在两种储锂机理，电压在 0~0.25V 之间，锂嵌入到石墨化部分中；电压在 0.25V 以上，嵌入机理随合成碳材料的程度不同而有所改变。700~1000℃ 合成的样品在 0.9~2V 充电时，锂同时嵌入到石墨层间及孔隙中；放电时，锂首先从石墨层间脱出，然后从孔隙中脱出。

4) 硬碳。常见的硬碳有树脂碳(如酚醛树脂、环氧树脂、聚糠醇 PFA-C 等)、有机聚合物热解碳(PVA、PVC、PVDF、PAN 等)、碳黑(乙炔黑)。

(4) 锂离子电池的电解液。选择电解液的一般原则是：化学和电化学稳定性好；具有较高的离子导电性，介电常数高，黏度低，离子迁移的阻力小；沸点高，冰点低，在很宽的温度范围内保持液态，以改善锂离子电池的高、低温性能；电解质的溶解度大；对电池的正、负极有较高的循环效率；具有适宜的物理和化学性能，比如蒸汽压力低，稳定性好，无毒且不易燃烧等。

表 1.8-26 列出了常用的锂二次电池电解液。目前，电解液常用的无机盐有 LiBF₄ 和 LiAsF₆，常用的溶剂有碳酸丙烯酯(PC)、碳酸乙烯酯(EC)、碳酸二乙酯(DEC)和四氢呋喃(THF)等。

表 1.8-26 常用的锂二次电池电解液

负极/正极	电解液	使用公司
Li/MoS ₂	LiAsF ₆ /PC+共溶剂	加拿大摩利 (Moli Energy)
Li-Al/TiS ₂	LiPF ₆ /McDOL+DME+添加剂	日立-麦克斯韦 (Hitachi Maxell)
Li 合金/C	LiClO ₄ /PC	日本松下
Li-Al/Polyaniline	LiClO ₄ /PC	日本普利司通-精工 (Bridgestone-Seiko)
Li-C/LiCoO ₂	LiPF ₆ /PC+DME	Sony Enertec (日本)

续表		
负极/正极	电解液	使用公司
Li-C/LiCoO ₂	LiBF ₄ /PC+EC+BL	A&T Battery (日本)
Li-C/LiCoO ₂	LiPF ₆ /EC+DME+共溶剂	日本松下
Li-C/LiCoO ₂	LiPF ₆ /EC+共溶剂	日本三洋
Li-C/Li _{1+x} Mn ₂ O ₄	LiPF ₆ /EC+DME	Bellcore (美国)
Li-C/LiNiO ₂	LiPF ₆ 或 LiN(CF ₃ SO ₂) ₂ /EC+共溶剂	美国雷特威 (Rayovac)
Li	有机电解液	以色列塔迪兰 (Tadiran)
Li/V ₆ O ₁₂	Li _x /PEO基聚合物	Valence (美国)

(5) 锂离子电池的性能。锂离子电池的性能主要包括电池充放电特性、温度特性、循环寿命、自放电特性、安全性等。他们的特性如图 1.8-105~图 1.8-108 所示。

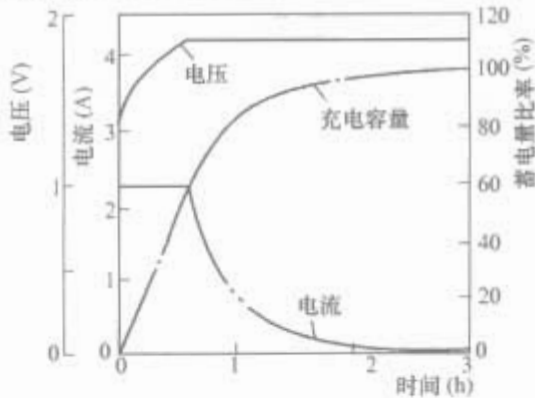


图 1.8-105 锂离子电池的充电特性曲线

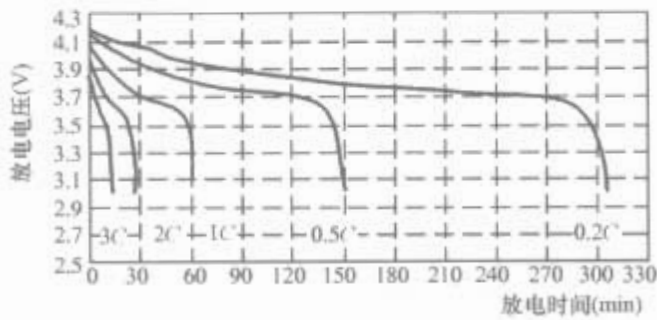


图 1.8-106 锂离子电池不同倍率的放电曲线

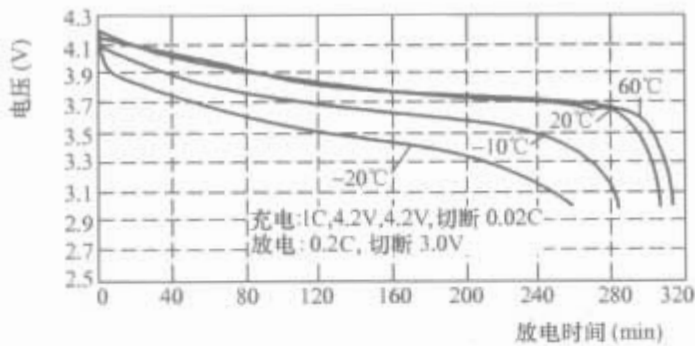


图 1.8-107 锂离子电池放电时的温度特性

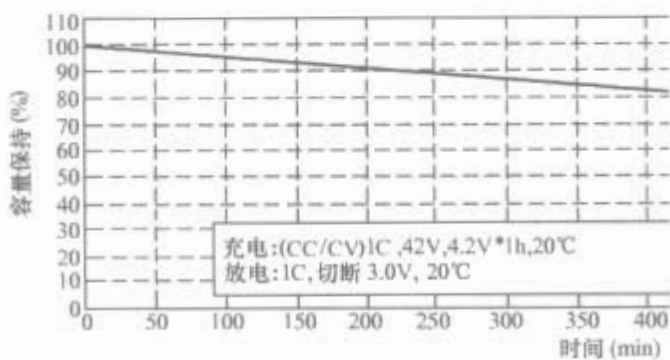


图 1.8-108 锂离子电池的循环寿命特性

许多电池厂家都在进行锂离子电池技术的开发，比如GS、日立、松下、法国帅福得公司、索尼和德国瓦尔塔电池有限公司等。从 1993 开始，SAFT 公司集中对镍基锂离子电池进行开发，生产的 10.5V C/LiNiO₂ 模块，具有 126W·h/kg 的比能量和 262W/kg 的比功率。另外，GS 公司集中对锰基锂离子电池进行开发，生产的 144V C/LiMn₂O₄ 电池具有 90W·h/kg 的比能量和 450 W/kg 的比功率。在 1995 年，日产 F 电动汽车首次使用了锂离子电池，而后日产 Prairie Joy 和 Altra 电动汽车也使用了锂离子电池。索尼锂离子电池比能量达到 90W·h/kg，比功率达 300W/L。Altra 电动汽车的最高车速为 120km/h，市区循环续驶里程为 192km。

6.1.2.4 金属空气电池

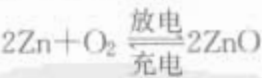
金属空气电池采用金属作负电极和空气作正电极。空气是一种取之不尽的资源。电池使用了空气和常用的金属，并且具有很大的潜力提高比能量和能量密度，引起了开发者们极大的兴趣。

金属空气电池具有电力充电方式和机械充电方式两种结构方案。常用的电力充电方式需要一个附加电极维持氧化作用或采用一个双功能电极以允许氧气的减少，机械充电方式通常采用更换金属电极的方法。

包括采用电力充电方式和机械充电方式的 Zn 空气电池、机械充电方式的 Al 空气电池在内的金属空气电池的显著优点是：高比能量和能量密度（Al 空气电池高达 600W·h/kg 和 400W·h/L），低价格（采用了常用金属材料 and 空气），良好的环保设计，平坦的放电曲线，以及与负载和工作温度无关的容量特性。采用机械充电方式的电池应用于电动汽车的显著优点是：采用加料方式实现了快速充电（与燃油车的加油方式相似），以及集中充电/回收方式实现了高效环保地利用电能。可充电金属空气电池的普遍缺陷是：比功率低，工作温度范围有限，空气中的二氧化碳溶于水生成碳酸中和碱性电解液并释放氢气等。

(1) Zn 空气电池。Zn 空气电池具有电力充电和机械充电等两种结构类型，并在电动汽车上得到了使用，但发展趋势为机械充电方式的 Zn 空气电池。

电力充电方式的 Zn 空气电池额定工作电压为 1.2V，比能量为 180W·h/kg，能量密度为 160W·h/L 和 95W/kg 的比功率。负电极为金属锌粒，正电极为空气中的氧气，电解液为氢氧化钾溶液。电池的化学反应方程式为



放电时，锌粒被氧化生成锌酸盐溶于电解液中并形成氧化锌；充电时，反应过程正好相反。但是在充、放电过程中，锌电极的形状发生了变化。

机械充电式的 Zn 空气电池避免了使用双极空气电极和锌电极在充放电循环中出现的形状改变问题。因此，机械充电式的 Zn 空气电池具有相对较高的比能量（230W·h/kg）和比功率（105W/kg）。考虑到电动汽车的实际运用，机械充电式 Zn 空气电池的充电系统采用在服务中心或服务站更换锌负电极盒的方法。使用过的锌负电极经过电化学过程进行充电并返回到客户服务中心。充电过程包括四步：首先，打开更换掉的电极盒，取出放电反应废物氧化锌；其次，把氧化锌溶于氢氧化钾溶液中形成锌酸盐；然后，电解锌酸盐溶液；最后，电解产生的锌粒被重新装到电极盒中。

机械充电式的 Zn 空气电池已在多种电动客车和电动商用车上得到应用，比如，在 1994 年，160kW·h 的 Zn 空气

电池被装在梅塞德斯—奔驰 180E 客车上并进行了测试,该车 64km/h 匀速续驶里程达到 689km。另外,德国邮政 Deutsche Post AG 投入 1800 万美元对采用机械充电式 Zn 空气电池的 20 辆梅塞德斯—奔驰 MB410 客车和 44 辆 Opel-Corsa Combo 轻型邮递车进行了测试并用于邮政服务。MB410 货车安装了 150kW·h 的电池,最高车速为 120km/h,满载 1700kg 货物的续驶里程达到 480km。

(2) Al 空气电池。金属空气电池的最新进展包括使用更具活性的金属铝,因为,铝材储藏丰富,成本低,处理方便。由于 Al 空气电池的充电电压很高并引起电解液中大部分水的电解,机械充电式 Al 空气电池系统成为发展方向。

Al 空气电池的标称电压为 1.4V,负电极为金属铝,正电极为空气。电解液可以是盐溶液或氢氧化钾溶液。机械充电式 Al 空气电池的放电反应方程式为



在低功率使用条件下,Al 空气电池使用盐溶液作电解液将极具吸引力。另外,使用碱溶液作电解液的 Al 空气电池具有更高的比能量(250W·h/kg)和能量密度(200W·h/L),适用于高功率的使用要求,但相应的比功率仅为 7W/kg。

由于 Al 空气电池极低的比功率,很少单独用作电动汽车能量源。为利用 Al 空气电池高的比能量和能量密度的优点,在电动汽车上使用时,通常与其他类型的充电电池组合作动力源,用于延长车辆续驶里程。

6.1.2.5 Na-S 电池

Na-S 电池技术包括基于 Na/S 和 Na/NiCl₂ 化合物的两种设计,即液态钠反应物和陶瓷 β-Al₂O₃ 电解液。Na/S 电池已经历了 25 年的发展,在 Na/S 电池出现十年之后,又出现了 Na/NiCl₂ 电池,该电池具有解决阻碍 Na/S 电池发展难题的巨大潜力。

(1) Na/S 电池。Na/S 电池的工作温度范围为 300~350℃,单体电池的额定电压为 2.0V,比能量为 170W·h/kg,能量密度为 250W·h/L,比功率为 390W/kg,对于不同的电池结构,性能指标不同,可降低为 100W·h/kg、150W·h/L 和 200W/kg。活性物质为熔铸钠负电极和熔铸钠多硫化物正电极。陶瓷 β-Al₂O₃ 电解液作为离子传导媒介和熔铸电极的隔离物,避免了电池的自放电。该电池的化学反应方程式为



放电时,Na 原子被氧化生成钠离子,钠离子通过电解液的传递与硫结合生成五硫化钠化合物。五硫化钠化合物又逐渐形成多硫化钠化合物(Na₂S_x,其中 x=5~2.7),充电过程正好相反。

Na/S 电池极具发展吸引力的特点在于:可以获得高的比能量 100W·h/kg,能量密度为 150W·h/L,比功率为 200W/kg,80%的能量效率,灵活的工作特性和对环境条件改变的不敏感,引起人们的开发兴趣已达 25 年多。但是,Na/S 电池还有一些局限,要实现商业化还需要解决许多实际问题,比如安全问题(熔铸活性物质具有腐蚀性并且反应活跃),冻结—解冻耐久力技术未得到解决(陶瓷电解液机械强度不够),需要对热进行管理(多余能量和发热的隔离)等。

(2) Na/NiCl₂ 电池。在 Na/NiCl₂ 电池中,活性物质为熔铸 Na 负电极和固体镍氯化物正电极。除了 Na/S 电池中

使用的陶瓷 β-Al₂O₃ 电解液外,还有一种储于正电极室中的辅助电解液(钠铝氯化物)。辅助电解液的功用在于从主电解液(陶瓷 β-Al₂O₃)传导钠离子到固态镍铝氯化物正电极。相应的电化学反应方程式为



放电时,固态镍铝氯化物转化为镍金属和氯化钠晶体;充电时,反应过程相反。Na/NiCl₂ 电池的工作温度为 250~350℃,电池单体的额定电压为 2.5V,与电池结构有关,性能指标可达到 86W·h/kg 的比能量,149W·h/L 的能量密度和 150W/kg 的比功率。与 Na/S 电池相比,具有如下优点:更高的开路电压,更宽的工作温度范围,化学反应物的安全性更好(比熔铸 Na₂S_x 的腐蚀性小),更加可靠的失效模式(在电解液失效后,Na 与辅助电解液反应生成物使电池单体短接),更好的耐冻结—解冻能力(更小的温度差)。但是,Na/NiCl₂ 电池仍然面临成本高的难题(镍成本较高),以及比功率低的缺点。

AEG ZEBRA 公司是 Na/NiCl₂ 电池的主要生产商。ZEBRA 电池(Z11 型)性能指标可达到 86W·h/kg 的比能量、149W·h/L 的能量密度和 150W/kg 的比功率。ZEBRA 电池已经在梅塞德斯—奔驰 190E 车上得到应用,该车最高车速为 115km/h,0~50km/h 加速时间 13s,市区行驶续驶里程 100km。

6.2 高速飞轮

高速飞轮储能器在理论上具有很高的动能,但由于在超高速旋转时的离心力的作用下,金属材料无法承受巨大的离心力所产生的应力,因此在实践中有很大的困难。20 世纪 70 年代中,美国能源部在铀原料的离子富集的研究中,使高速飞轮储能器的技术有了重大的突破。随着电动汽车的发展,高强度碳纤维复合材料的发明,以及磁悬浮轴承的应用,高速飞轮储能器技术在实践上已经向前大大地推进了一步,并为电动车辆所采用。1992 年,美国飞轮系统公司开始着手电动车辆高速飞轮储能器的研究和开发,1999 年 5 月,英国在布里斯托市建立了第一辆用高速飞轮储能器驱动的超轻有轨电动汽车,整车质量为 2700kg,可乘坐 34 人,续驶里程达 10km,充电时间仅需 90s。

6.2.1 飞轮储能器的工作原理

飞轮储能器中没有任何化学活性物质,也没有任何化学反应发生。旋转的飞轮是纯粹的机械运动。飞轮在转动时

$$W = \frac{1}{2} J \omega^2$$

式中:J 为飞轮的转动惯量;ω 为飞轮旋转的角速度。

由公式可知,加大飞轮的直径和飞轮的质量,都能够增加飞轮的转动惯量,飞轮的动能也增加。但是,庞大、沉重的飞轮若以高速旋转时,飞轮受到极大的离心力作用,往往超过飞轮材料的极限强度,很不安全。因此,用增大飞轮的转动惯量的方法来增加飞轮的动能是有限的。飞轮的动能与角速度的平方成正比,在不提高飞轮的直径和飞轮的质量情况下,提高飞轮旋转的角速度能够明显地提高飞轮的动能。现代飞轮储能器所用的飞轮一般都是尺寸小、质量小,并具有超高角速度旋转的小型飞轮,飞轮的转速可以达到 200000r/min。实际上,飞轮的最大转速 ω_{max} 受材料承应力的限制。

飞轮储能器的能量储存与释放

$$P_c(t) = [J_1 \omega(t) + C_1 \omega^2(t) + C_2] \omega^2(t)$$

$$P_d(t) = [J_1 \omega(t) + C_1 \omega^2(t) - C_2] \omega^2(t)$$

式中： P_c 为储存功率； P_d 为释放功率； J_f 为飞轮转子的转动惯量； ω 为飞轮转子的角速度； C_1 为空气阻力系数，由飞轮转子周围中气产生； C_2 为旋转阻力系数，由飞轮转子的惯性产生。

在飞轮储存能量和释放能量过程中，要受到周围空气阻力的作用，因此飞轮储能器一般是在密封的真空外壳中高速旋转。但是，当飞轮转速由 ω_{min} 逐渐增加到 ω_{max} 时，由于飞轮动能变化，产生的阻力转矩随飞轮转速变化递增

$$\frac{dE}{d\omega} = -T_h \omega \frac{dt}{d\omega}$$
$$T_h = -C_1 \omega^2(t) - C_2$$

式中： T_h 为飞轮动能变化产生的阻力转矩。

超高速飞轮可采用等应力设计原则，为了获得最大的能量存储量，飞轮转子的每一部分都具有相等的应力，结果飞轮外形随着转子直径的增加，飞轮厚度递减；另外，为了实现高速飞轮的储能，永磁无刷电动机被认为是最理想的驱动电动机。永磁无刷电动机除了具有高的能量密度和高效率的特点之外，还具有在工作过程中电动机内部不产生热量的优点，保证了转子在真空环境条件下正常地工作。定子线圈采用循环液体冷却方式，定子铁心通过定子绕组和外壳传导散热。除了采用真空室减小风摩擦损耗外，使用磁性轴承也可以减小摩擦损耗。磁性轴承与其他器件无机械接触，延长了飞轮的使用寿命。图 1.8-109 给出了典型的超高速飞轮的基本工作原理，该飞轮使用复合材料转子，采用等应力的设计原则，使用永磁无刷电动机和磁性轴承。

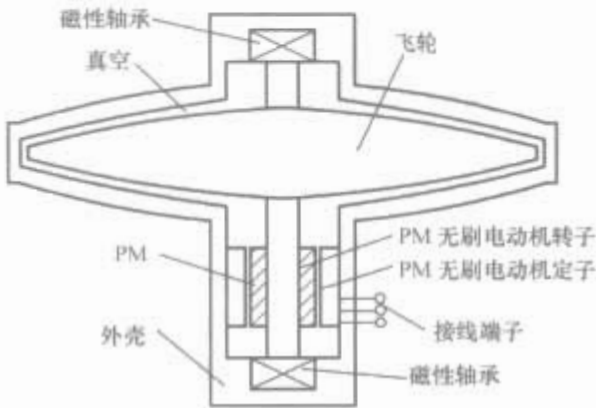


图 1.8-109 典型超高速飞轮的工作原理

使用电动机实现电能和机械能之间的转换，需要考虑的另外一个问题是实现电能不同方式转换的功率变换器的设计。所使用的功率变换器必须能够实现双向功率流动，以向永磁无刷电动机供能和从永磁无刷电动机吸收能量，而且，该功率变换器应具有高功率密度和高能量转换效率。目前，人们正在研究通过采用不同的软开关技术来提高器件的工作频率并降低开关损耗，以达到提高功率变换器的功率密度和工作效率。

6.2.2 飞轮储能器的转动惯量

一般飞轮储能器多采用绕垂直轴旋转的结构形式，因为在地球重力场中，绕垂直轴旋转的飞轮储能器受地球重力场的影响比绕水平轴旋转的飞轮储能器小，而且绕垂直轴旋转的飞轮储能器的陀螺效应，更有利于飞轮储能器保持稳定的运转。

飞轮储能器通常包括飞轮转子和电动/发电机两大部分组成，因此是一个复杂的复合旋转体，对其采用将复杂的复合旋转体分解为若干个简单几何形状的旋转体（一般是轴对称的均匀回转体），分别计算几何形状的旋转体的转动惯量，然后按照飞轮储能器的结构将它们转动惯量叠加。几种轴对称的均匀回转体的转动惯量见表 1.8-27。

6.2.3 飞轮储能器的能量储存与释放工作循环

飞轮储能器的能量储存与释放是飞轮储能器的重要的设计指标。飞轮储能器的能量储存与释放工作循环见图 1.8-110。当飞轮储存能量时，飞轮转子加速；之后，飞轮保持匀速旋转；当飞轮释放能量时，飞轮转子减速。

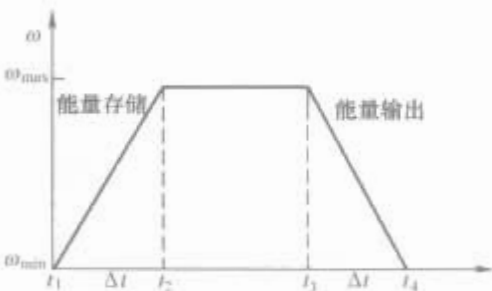


图 1.8-110 飞轮储能器的能量储存与能量释放工作循环

6.2.4 飞轮储能器的构造

先进的飞轮储能器的比能量可以达到 150W·h/kg，是镍—氢电池的 3 倍；比功率为 5000~10000W/kg，大大地超过内燃机（600~800W/kg）。飞轮储能器体积小，质量小，充电快（一般只要 10min 的时间），寿命长，没有各种化学反应产生的老化现象，而且没有任何化学反应和任何废气排出，也没有废料回收，是一种纯洁的“零污染”能源。

表 1.8-27 不同几何形状的旋转体的转动惯量

项 目	圆 柱 体	圆 环 体	椭 球 体
形 状			
体积	$V = \pi r^2 h$	$V = \pi h (R^2 - r^2)$	$V = \frac{4}{3} \pi abc$
质量	$m = \pi r^2 h \rho$	$m = \pi h (R^2 - r^2) \rho$	$m = \frac{4}{3} \pi abc \rho$
几何中心	$\frac{h}{2}$	$\frac{h}{2}$	椭球中心处
转动惯量	$J_z = \frac{r^2}{2} m$	$J_z = \frac{(R^2 + r^2)}{2} m$	$J_z = \frac{(a^2 + b^2)}{5} m$
参数	r —圆柱体半径 h —圆柱体的高 m —质量 ρ —材料密度	R —圆柱体外半径 r —圆柱体内半径 h —圆柱体的高 m —质量 ρ —材料密度	a —椭球体 x 方向半径 b —椭球体 y 方向半径 c —椭球体 z 方向半径 m —质量 ρ —材料密度

在电动车辆上,大多数飞轮储能器是在飞轮的内部装有电动/发电机,一般为永磁同步电动机,兼有驱动和发电的功能。“充电”时,电动/发电机以电动机的形式运转,外电源驱动“电动机”运转,使飞轮转速增加,将电能转换为飞轮的机械能。“放电”时,电动/发电机以发电机的形式运转,高速旋转的飞轮带动“发电机”发电,将飞轮的机械能转换为电能,供驱动电动机使用,实现电能—机械能—电能的循环转换。在飞轮储能器上配置电子管理系统,以控制飞轮储能器的安全运转。

通常飞轮储能器是飞轮与永磁电动/发电机共同组成的复合飞轮旋转体。飞轮储能器有两种结构模型,如图1.8-111所示。

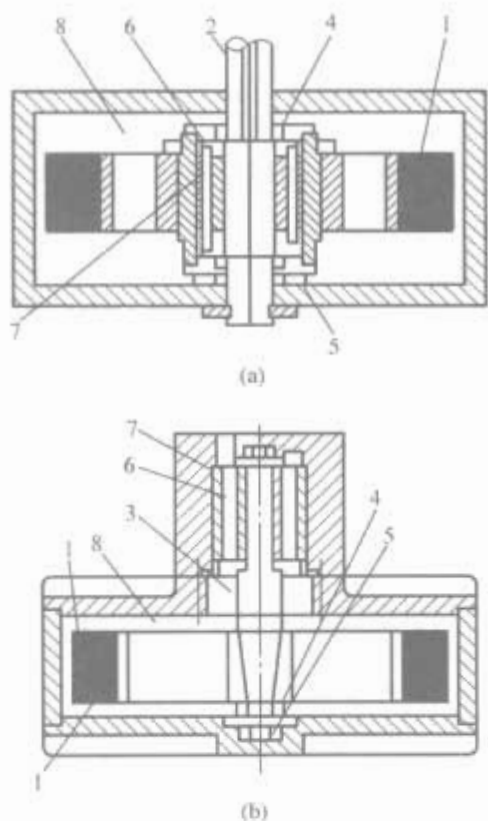


图 1.8-111 飞轮储能器的飞轮与永磁电动/发电机的装配形式

(a) 用固定轴支承旋转的结构形式;

(b) 用旋转轴支承旋转的结构形式

1—飞轮转子; 2—固定轴; 3—旋转轴; 4—滚动轴承; 5—磁悬浮轴承; 6—电动/发电机定子; 7—电动/发电机转子; 8—真空室

永磁电动/发电机安装在飞轮的中央,用固定轴支承旋转。固定轴不随飞轮旋转体一起旋转,这种结构紧凑,但电动/发电机装置在飞轮旋转体之内,控制和维护比较困难。

另外,用旋转轴支撑飞轮旋转体旋转,再由转轴带动永磁电动/发电机转动,这种结构的永磁电动/发电机装置在飞轮旋转体之外,由转轴带动永磁电动/发电机的操作和控制。

6.2.4.1 飞轮材料

理论上,飞轮储能器可以储存巨大的能量并有转换能量的能力,是性能最好、结构最简单的机械型的储能器。由计算结果表明,一个直径为 230mm、质量为 13.5kg 的飞轮,要达到比能量 $150\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 时,飞轮的转速将达到 $150000\sim 200000\text{r}/\text{min}$;在这样高的转速下,制造飞轮的材料所受到的离心力要比钢材的强度大 12 倍,离心力所产生的应力将大大地超过钢材的许用应力,飞轮的结构会因强度不足而破裂,高速飞出的飞轮碎片有极大的破坏力,十分危险,因此,根本不能用钢材来制造飞轮。通常需要用碳纤维等超高强度的材料来制造飞轮的转子。国外发明的名为开富

勒(Kavlar)的碳纤维增强的环氧树脂复合材料,强度高、密度小,能够用来做飞轮的转子。这种材料即使在受离心力作用而被破坏时,会分散成絮状绒毛,不会造成危害,用此类超强材料作为飞轮材料,可以保证安全。

6.2.4.2 动平衡

在超高速旋转的飞轮中,如果飞轮中有任何方向的极小的不平衡,都会造成严重的后果。因此要求飞轮转子的材料绝对均匀和平衡,并必须有非常好的动平衡精度。制造飞轮转子与制造航空和航海用的陀螺仪在技术上很相近,许多技术和工艺可以采用。美国飞轮系统公司(AFS)用开富勒碳纤维增强环氧树脂复合材料绕制飞轮转子,并与在制造飞机和卫星导航用的陀螺仪的 Honeywell 公司合作,用高新技术对飞轮转子进行动平衡,制造了高精度平衡的飞轮储能器。

6.2.4.3 磁悬浮轴承

在 $200000\text{r}/\text{min}$ 的超高转速条件下转动,普通轴承是无法承受的,唯有采用磁悬浮轴承才能解决普通轴承的磨损和润滑所不能达到的技术要求。现代采用的磁悬浮轴承是用永磁材料制造成刚度大、对称性好、稳定性好的轴承,并且经过严格的动平衡,磁悬浮轴承利用磁极的异性相斥和超导体的抗磁性的物理特性,使飞轮转子在高速旋转时,轴的旋转部分与轴承的终止部分脱离接触,呈悬浮状态,而没有任何磨损,也不需要润滑。

6.2.4.4 真空环境

在 $200000\text{r}/\text{min}$ 的超高转速条件下转动时,飞轮周围的空气会形成强烈的涡流,造成巨大的空气阻力,会损耗飞轮的能量,这对转子的运动非常不利。现代高速飞轮储能器是在高度密封的环境中运转,真空容器的真空度在 $10^{-3}\sim 10^{-4}\text{Pa}$ 以下。关键是解决真空容器的密封,以防止外部气体渗入真空容器中;还要解决飞轮系统材料逸出的气体,它也会破坏真空容器的真空度。

6.2.5 各国的飞轮储能器的现状

飞轮储能器可以作为独立的动力源应接驱动车辆行驶,也可以作为辅助动力源。在作为辅助动力源时,飞轮储能器主要的作用有以下方面:①稳定主动力源的功率输出:在电动车辆起动、爬坡和加速时,飞轮储能器能够快速、大能量地提供动力(放电)。②为主动力源提供辅助动力,并减少主动力源的功率输出的损耗,提高再生制动时能量回收的效率,在电动车辆下坡、滑行和制动时,飞轮储能器能够快速、大能量地储存动能(充电),充电速度不受“活性物质”化学反应速度的影响,提高再生制动时能量回收的效率。

(1) 瑞士得利康(Delikon Energy)公司的飞轮储能器电动客车。1950年,瑞士得利康公司研究和制造了世界上第一辆飞轮储能器电动客车,能够装载 70 名乘客;飞轮的直径为 2.4m,质量为 1500kg,但一次充电后的行驶里程仅为 500m,没有实用价值。主要问题是制造飞轮的材料所能承受的应力较低,不能用提高飞轮的转速来加大它所储存的功能。

(2) 美国 unique Mobility 公司和福特汽车公司联合开发的飞轮储能器(图 1.8-112)。用碳纤维复合材料制成的飞轮转子的直径为 400mm,飞轮转子用磁性轴承支撑。旋转的飞轮系统封闭在真空中外壳中,转子的中间为电动机/发电机组,总储存能量为 $88\text{W}\cdot\text{h}$,额定功率为 25kW。这种飞轮电池主要用于混合电源系统(例如与燃料电池、锌—空气电池混合使用)中,来提高电动汽车、FC 电动汽车或 H 电动汽车的动力性能。

(3) 美国 lawrence Livermore 国家实验空(LLNL)致

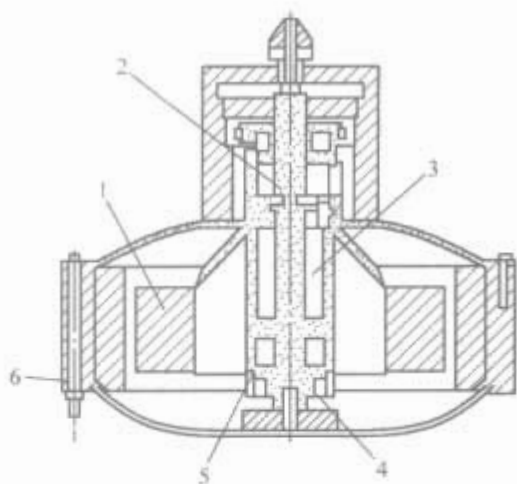


图 1.8-112 美国 unique Mobility 公司和福特汽车公司联合开发的飞轮储能器
1—飞轮转子；2—固定轴；3—旋转轴；4—滚动轴承；
5—磁性悬浮轴承；6—电动/发电机定子

力于超高速飞轮的研究，开发出用于电动汽车的 1kW·h 的小型车载飞轮模块和用于固定电站的 2~25kW·h 的大型飞轮模块。进行超高速飞轮研发的还有 Ashman 科技公司、AVCON、Northrop Grumman、Power R D rocketdyne/Rockwell、Trinity、Flywheels 和美国飞轮系统等。基于目前的技术现状，整体式超高速飞轮系统可达到 10~150W·h/kg 的比能量和 2~10kW/kg 的比功率。LINL 开发的超高速飞轮（转子直径为 200mm，高为 300mm）最高转速可达 60000r/min，存储能为 1kW·h，最大输出功率为 100kW。

(4) FLAT Cinquecento Elettra 已经开始对超高速飞轮的实用性能进行评价，具体是把采用超高速飞轮作铅酸电池辅助能源的混合能量源系统用于电动汽车上，并进行试验测试，模拟计算结果显示使用该系统可节能 20%。若单独采用超高速飞轮作电动汽车的动力源，则一次充电续驶里程期望达到 200km。飞轮电池进一步的发展集中在优化飞轮整体质量、体积和成本，并实现在电动汽车上的实用化。

6.2.6 面临的问题

超高速飞轮用作电动汽车的储能装置面临两个大问题。首先，当车辆转弯或严重颠簸，偏离直线行驶时，飞轮将会产生陀螺力矩。陀螺力矩将严重影响车辆的操纵性能。其次，若飞轮出现故障，以机械能形式存储在飞轮中的能量就会在短时间内释放出来，相应地，产生的大功率输出将对车辆会产生巨大破坏。比如，若 1kW 的飞轮失效，在 1~5s 内将产生 720~3600kW 的功率输出。因此，故障抑制一直是超高速飞轮用于电动汽车面临的巨大障碍。

减小陀螺力矩的一个简单措施是使用多个小型飞轮，把它们设计成连接成组，一半以顺时针旋转，另一半以逆时针旋转。理论上，作用在电动汽车上的总陀螺力矩为零，但实际上，这些飞轮的分布排列及协调工作还存在许多问题。另外，这些飞轮总的比能量和比功率可能会小于单个飞轮的比能量和比功率。同样，采用多个小型的飞轮模块也可以减小超高速飞轮失效时对车辆造成的破坏程度，但也面临可能出现的比能量和比功率减小的问题。目前，已经出现了一种新型的故障抑制措施，该措施采用增大飞轮转子边缘的厚度，而不是按照等应力设计的原则减小飞轮的边缘厚度，当飞轮转子出现故障时，转子边缘较厚的部分就会首先脱落，起到熔断丝的作用。

超高速飞轮可用作固定储能系统（25kW·h 的容量和 130 kW 的功率输出）为电动汽车充电，原因在于飞轮具有

大功率输出的能力，减小了电力系统的峰值功率输出，便于实现对电池系统的快速充电。超高速飞轮用于电动汽车的这种新型方式引起了人们的很大关注，这种方式与用作车载储能系统的方式相比，更容易实现。

6.3 超级电容器

6.3.1 超级电容器的特点

(1) 超级电容器在充电—放电的过程，实现电能—电场能—电能的转换，整个过程中没有任何化学反应，不需要高速旋转的飞轮，不存在对周边环境的污染，也没有任何噪声，结构简单，质量轻，体积小，是一种理想的储能器。

超级电容器的电容量从 1F 到几千法，工作电压从几伏到几百伏，放电电流可高达几千安培，能量密度比传统的电容器高近百倍，瞬时放电功率比铅酸蓄电池高十倍，充、放电次数可高达几万次。当电动车辆起动和加速时，短时间内需要大电流，如果用超级电容器提供大部分电流，就可以大大地减轻动力电池组的负荷，延长动力电池组的寿命。

(2) 超级电容器是在复合动力汽车和电动车辆停车时，由外接电源向超级电容器充电，使电容器集聚大量的电荷，然后在电动车辆行驶时，超大电容器释放电能，即放电，向驱动电动机提供电能。

(3) 超级电容器能够实现快速充电，在极短时间内即可完成电容器的充电。超级电容器可能发展为用“强力微波充电”的电子储能器，将彻底改变电动汽车的车载电源面貌。

(4) 超级电容器要进一步提高容量，还必须改进电容板的材料。现代多采用有机物高效电解质和高绝缘性的绝缘层。对于超级电超级电容器放电的控制，需要进一步解决智能化控制技术。

6.3.2 超级电容的设计

在电池+超级电容混合能量系统用于电动汽车之前，应明确几个概念。电池的输出功率应与车辆平均行驶功率需求相当，而超级电容应输出高于平均功率需求的功率，并且可吸收再生能量。当车辆的实际行驶功率需求高于超级电容的最大功率时，多余部分由电池提供。超级电容由再生能量为其充电，若没有充足电，剩余部分由主电池在车辆低功率行驶时进行补充。当超级电容充满电时，再生制动能量为主电池充电。在主电池和超级电容之间采用两象限 dc—dc 变换器控制它们之间的功率分配，并限制主电池在车辆低功率行驶时对超级电容的充电率。若没有 dc—dc 变换器，则主电池和超级电容将具有相同的电压，导致超级电容仅在电池电压发生快速变化时输出和接受功率，减弱了超级电容的负载均衡作用。

采用双层电容技术是实现超级电容概念的主要措施，双层电容的原理如图 1.8-113 所示。当在电极上加上电压时，由于电解质分子的趋偶和排列作用，在两个电极的表面形成了一个双层电容，电容器的这种极化作用可以储存电能，这是因为

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$
$$E = \frac{1}{2} C U^2$$

式中：ε 为有效电介质常数；
d 是间隙距离；A 为电极表

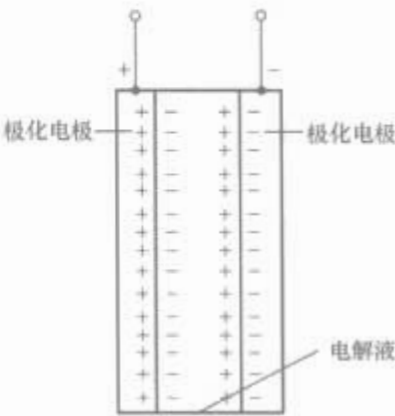


图 1.8-113 双层电容的原理图

面积； C 为电容器的电容量； U 为外加电压； E 为储存的能量。使用高 ϵ 的电介质材料，缩短分层间距，增加电极表面积，可以提高电容器的电容量。目前的超级电容技术使用碳金属纤维复合物，或在碳纤维布料上涂导电聚合物，以及采用在金属箔上包裹金属氧化物的电极技术，电解液使用水有机溶液或固态聚合物等。

混合能源系统所用的超级电容器的大小可以用简单的能量等式计算。对前面提到的电动汽车用电池+超级电容器的混合能量源，电池的输出应限制在车辆匀速行驶时的功率需求，而剩余部分由超级电容提供，超级电容器的最大存储能量 W_{cap} 应该等于电动汽车加速爬坡时的最大能量需求，相应的能量计算为

$$W_{cap} = \left(\frac{1}{2}mv^2 + mgh \right) / \eta$$

式中： m 为整车质量； v 为最高车速； g 为重力加速度； h 为电动汽车的最大爬坡高差； η 为超级电容的工作效率。因此，超级电容所需的电容量计算如下

$$W_{cap} = \frac{1}{2}C(U_{max}^2 - U_{min}^2)$$

式中： U_{max} 和 U_{min} 分别为电容器允许的最高和最低电压。

6.3.3 超级电容综述

根据美国能源部对电动汽车用超级电容提出的目标（见表 1.8-28），近期内比能量和比功率应分别达到 $5W \cdot h/kg$ 和 $500W/kg$ ，最好分别超过 $15W \cdot h/kg$ 和 $1600W/kg$ 。一些公司已经开始积极地研发电动汽车用超级电容。

表 1.8-28 美国能源部制定的超级电容器近期和长期发展目标

项 目	单 位	近 期	长 期
储存能量	$W \cdot h$	500	750
最大功率	kW	50	80
比能量	$W \cdot h/kg$	>5	>15
比功率	W/kg	>500	>1600
质 量	kg	<100	<50
体 积	L	<40	<20
效 率	$\%$	>90	>90

Maxwell 科技公司宣称，他们生产的功率存储器——PC7223 超级电容具有最高的电容量（ $2700F@2.3V$ ），并已进入批量化生产。由表 1.8-29 可知，该电容器的比能量和比功率分别为 $2.48W \cdot h/kg$ 和 $732 W/kg$ 。使用 28 个 PC7223 电容器串联得到的 $56V@95F$ 超级电容器可储能 $150kJ$ ，同时可提供 $1.12W \cdot h/kg$ 的比能量和 $330W/kg$ 的比功率。松下也成功生产出一系列的电容器（最大达到 $1800F@2.3V$ ）。

表 1.8-29 2700F 超级电容器特性参数

外 形 尺 寸	164mm×62mm×62mm
质量 (kg)	0.8
体积 (L)	0.623
额定电容 (F)	2700
标称电压 (V)	2.3
额定电流 (A)	400
比能量 ($W \cdot h/kg$)	2.48
比功率 ^① (W/kg)	732
工作温度 ($^{\circ}C$)	-20~60
串联内阻 (mΩ)	0.85

① 6s 放电电压由 2.3V 降到 1.5V。

目前，菲亚特 Cinquecento Elettra 使用德国阳光（Son-nenschein）电池有限公司的铅酸电池（ $9kW \cdot h$ ，300kg）和 Alsthom Alcatel 超级电容器（ $250W \cdot h$ ，60kg）组成了电池+超级电容的储能器，并进行了性能测试。在不改变整个储能系统的总质量的前提下，模拟计算的结果显示，对市区和郊区行驶工况可分别节能 40% 和 20%，并且在完整的 ECE 行驶循环条件下可节能 14%。后来，Chugoku 电力公司和丰田汽车公司研发中心合作在 Mazda Bongo Friendee 上安装了 VRLA+超级电容器的混合储能系统进行性能测试，该储能系统使用 40×2 的松下超级电容器（ $1600F@2.3V$ ），用超级电容作负载均衡装置，使得阀控铅酸电池可以更好地应用于电动汽车。但在超级电容器广泛应用于电动汽车之前，提高其性能，尤其是比能量，以及降低成本成为迫切需要解决的问题。

7 电动汽车的辅助系统

与燃油车类似，电动汽车也需要许多辅助子系统来提高汽车的操纵性和驾驶员的舒适性，其中有些辅助系统，如蓄电池的充电器、电油管理系统（电动汽车）及再生制动系统等是电动汽车所独有的。而另外一些辅助设施，如空调器、辅助动力源、动力转向系统、导航系统、照明装置、除霜装置、雨刮器及收音机等是电动汽车与燃油车所共有的。即使这些共有的装置，许多用在电动汽车上的辅助系统，如空调器、辅助动力源、动力转向系统和导航系统等，都有自己独到的特点和作用。

因为所有的电动汽车辅助子系统都涉及电能的控制，所以能量管理系统（EMS）在现代电动汽车中起着非常重要的作用。能量管理系统采集从电动汽车各子系统通过传感器收集到的运行数据，完成下列功能：选择电池的充电方案，显示蓄电池的荷电状态（SOC），预测剩余行驶里程，监控电池的动作，调节车内温度，调节车灯亮度，以及回收再生制动能量为蓄电池充电等。电动汽车是 EMS 中的一个主要子系统，它处理蓄电池的显示、测量、预测和全面管理等问题。

7.1 蓄电池充电技术与充电器

对于实际的电动汽车而言，蓄电池充电器是不可缺少的子系统之一。蓄电池的电能用完之后，用它给电池再充电。电动汽车的充电器一般分为车载和非车载两种。车载充电器主要用于小功率和充电时间长的场所，应该尽可能做得体积小、质量小，以减小充电器对续驶里程的不良影响。非车载充电器主要用于大功率和快速充电的场合，没有体积和质量的限制。带车载充电器的现代电动汽车也可以利用非车载充电器进行充电。

在设计充电器和电池管理系统之前，首先必须明白电动汽车蓄电池的充放电特性。实际上，蓄电池充电器的设计主要是以电池的充电特性为基础的，而蓄电池显示器的设计主要是以电池的放电特性为基础的。

7.1.1 蓄电池充电技术

当蓄电池用完它所储存的能量，或者达到它的终止电压时，蓄电池必须停止放电，并需要再充电。蓄电池充电时，其充电特性随充电电流、充电时间和温度的变化而变化。几种电动汽车常用蓄电池的典型充电特性曲线如图 1.8-114 所示。

一般而言，对于不同蓄电池充电特性，有多种充电方式可用，但是在充电过程中，必须严格控制电压和温度，以防

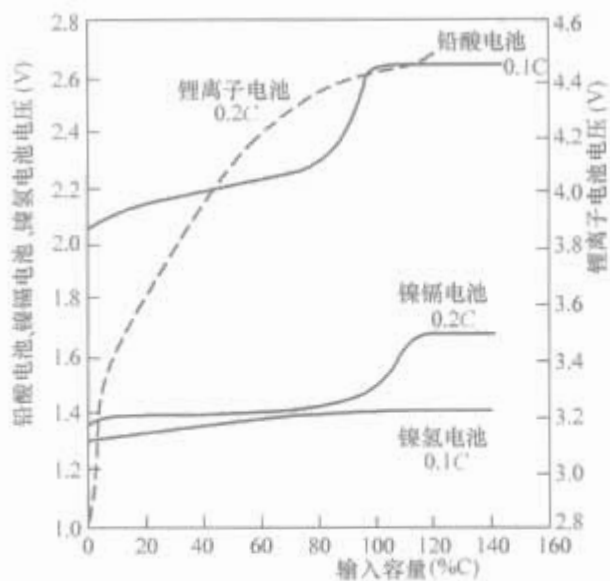


图 1.8-114 不同蓄电池的充电特性

止蓄电池的过充和过热，因为过充或过热对蓄电池的性能和寿命会产生永久性的损坏，甚至会引发严重的安全问题。目前，有几种通用的充电方式适合不同类型的蓄电池充电使用。

(1) 恒流充电。恒流充电时，自始至终都是以恒定不变的电流进行充电。恒定电流用调整充电机的电流来控制，在一般的硅整流器充电器中即可实现，充电操作简单、方便，但要求采用小电流、长时间的充电模式，恒流充电一般需要15h以上。恒流充电方法适合于多个蓄电池串联的动力电池组的充电，其中落后的蓄电池的容量易于恢复。

恒流充电的不足是，开始充电阶段充电电流过小，在充电后期充电电流又过大，整个充电时间长，析出的气体多，对蓄电池的板极冲击大，能耗高，充电效率不超过65%；而且免维修蓄电池不宜采用恒流充电，除蓄电池需要小电流、长时间地进行活化充电外，已经较少采用恒流充电。将恒流充电变型为“分阶段恒流充电”，也称为“递减充电”，使充电电流能够在充电后期逐渐减小，适应蓄电池的特性。这需要参照生产厂家使用说明书，按照规定确定各个阶段电流的大小、电流转换的时间和充电终止判断的依据，以保证充电正常进行。

(2) 恒压充电。恒压充电是对每个单体蓄电池均以某恒定电压进行充电，这样在充电初期电流很大，随着充电进程电流会逐渐减小，在充电终期只有很小的电流通过，在整个充电过程中不需要调整充电电流，操作比较简单。由于随充电过程电流自动减小，析出的气体少，能耗低，充电效率可以达到80%，如果充电电压选择恰当，充电时间约8h。

恒压充电的缺点是，如果蓄电池放电深度过深，充电的电流会很大，不仅会危及充电机的安全，而且会对蓄电池造成损害。若充电电压选择过低，则后期充电电流过小，使得充电时间延长。蓄电池的端电压的变化难以补偿，充电过程中对落后的蓄电池实现完全充电很难完成。恒压充电一般应用在电池组电压较低的场合，不适宜对多个蓄电池串联的动力电池组进行充电。

为补救恒压充电的缺点，采用“恒压限流”的方法。在充电电源与蓄电池之间串联一个“限流”电阻，当电流大时，“限流”电阻上的电压降也大，从而降低充电电压；当电流小时，“限流”电阻上的电压降也小，从而提高充电电压，这样就自动地调整了充电电流，使充电初期的电流控制在某个限度内。

(3) 快速充电。对蓄电池进行快速充电既不能用恒流大电流充电，也不能用较高的恒压充电，否则蓄电池

温度会很快地上升，损伤电极和浪费电能。快速充电是使电流用脉冲的方式输送给蓄电池，并随着充电时间的延续，蓄电池有一个瞬间的大电流放电（称为负脉冲），使电极去极化。

(4) 智能充电。智能充电应用 dU/dt 的技术，跟踪检测蓄电池端电压在单位时间内的变化量，特别是在蓄电池充电的后期，不同类型的蓄电池在充电后期呈现不同的变化规律，并动态跟踪蓄电池可以接受的充电电流，保持充电电流始终处于蓄电池可接受的充电电流曲线附近，使蓄电池几乎在无气体析出的条件下进行充电。只要确定 dU/dt 的值，蓄电池的充电深度就基本确定，并可以判断终止的条件。

(5) 均衡充电。在全浮式或半浮式充电运行的动力电池组中，虽然动力电池组中的蓄电池都是在相同的条件下运行的，但由于某种原因可能出现各个蓄电池之间的不均衡，其主要出现在：

- 1) 浮充发电机或充电机停止运转，由动力电池组负责全部电能的供应。
- 2) 由于某种原因，迫使动力电池组以较大的电流放电。
- 3) 动力电池组放电后未能及时充电。
- 4) 动力电池组中有个别蓄电池的电压、电解液密度偏低，形成动力电池组中蓄电池有差别时，均衡充电实际上是以小电流（约20h率的电流）进行1~3h的过充电过程，一般均衡充电不能频繁进行。

7.1.1.1 铅酸电池的充电技术

铅酸电池一般在任何充电率下充电都不会产生过度的冒气、过电压或过热等现象。铅酸电池在充电初期，可以用大电流对其充电，但当蓄电池基本达到满充时，充电电流必须限定在一个安全的范围内。深度放电的电池（如20% SOC）在蓄电池的端电压相对较低且低于冒气电压（约为2.4V）充电时，具有较高的充电效率；但当蓄电池基本达到满充时，如果继续保持大的充电电流，蓄电池的端电压就会增加得过高，从而导致过充和冒气。

20世纪60年代中期，美国科学家马斯对蓄电池充电过程的出气问题进行了大量的试验研究工作，提出了以最低出气率为前提的蓄电池可接受充电电流曲线，见图1.8-115。

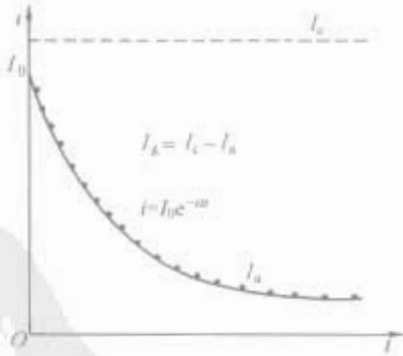


图 1.8-115 蓄电池可接受充电电流曲线

α —蓄电池固有充电电流接受比； I_a —蓄电池实际充电电流； I_g —蓄电池可接受的充电电流； I_k —蓄电池内产生气泡的电流

在充电过程中，由于蓄电池内部的极化现象逐渐严重，蓄电池可接受的充电电流 I_a 逐渐减小。如果蓄电池的实际充电电流 $I_c > I_a$ ，蓄电池内部将产生大量的气体，造成蓄电池剧烈冒气。这样不但浪费了电能，而且还会缩短蓄电池的寿命。

国内外研制的快速充电装置中一大类是基于蓄电池可接受充电电流曲线的基础上设计制作的。它的出发点在于承认蓄电池有着本身固有的一条蓄电池可接受充电电流曲线，在充电器设计时，尽量使充电电流大小的变化曲线贴近这条固有的可接受充电电流曲线，这样做的好处是它可以控制蓄电池的出气和发热，减少无谓的电能消耗，加快充电时间，提高充电效率。

这一类充电方法称为连续大电流快速充电法，可细分为：

(1) 定电压充电法，如图 1.8-116 所示。

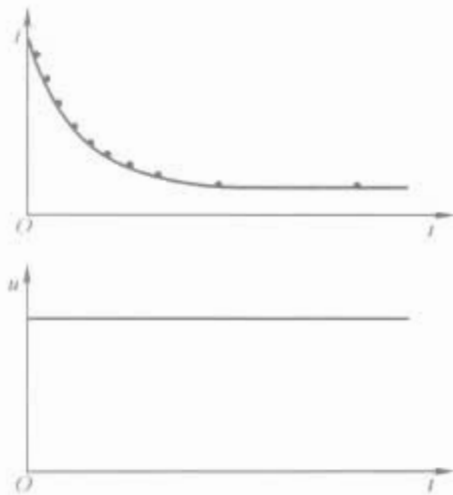


图 1.8-116 定电压充电法电压电流波形

(2) 定出气率充电法，如图 1.8-117 所示。

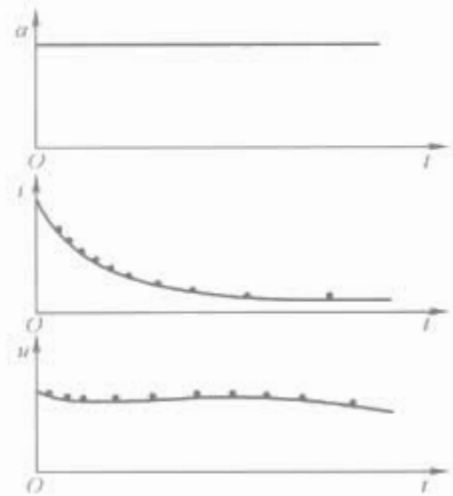


图 1.8-117 定出气率充电法的出气率、充电电流和电压曲线

(3) 恒温充电法，如图 1.8-118 所示。

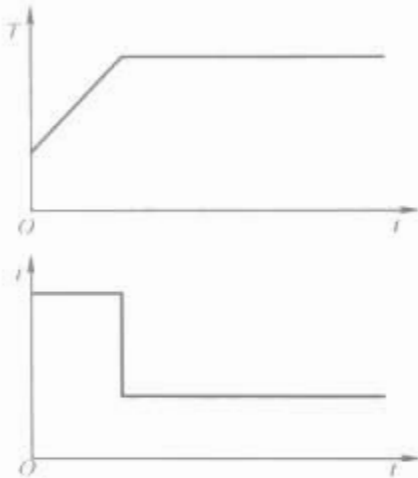


图 1.8-118 恒温充电法的充电电流和蓄电池温度变化曲线

同时，马斯还总结出铅酸电池充电特性的三条规律，被称为马斯三定律。

定律一：对于任意给定的放电电流来说，蓄电池充电电

流接受比与它已放出电荷量的平方根成反比，即

$$\alpha = K / \sqrt{C}$$
$$I_0 = C\alpha = K \sqrt{C}$$

蓄电池可接受的初始充电电流 I_0 与蓄电池的容量有关，容量越大，蓄电池可接受的初始充电电流越大。

定律二：对于任意给定的放电深度来说，蓄电池充电电流接受比与蓄电池放电电流的对数成正比。放电电流越大，蓄电池可接受的初始充电电流也越大

$$\alpha = K \log_k I_d$$
$$I_0 = KC \log_k I_d$$

根据第一和第二定律可知，在充电过程中，适当地穿插大电流脉冲放电以后，由于放电电流 I_d 很大而放出的电量很少，所以可以大大提高蓄电池可接受的初始充电电流。

定律三：蓄电池在以不同的放电率放电后，其最终的允许充电电流 I_i （接受能力）是各个放电率下的允许充电电流的总和

$$I_i = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots$$

马斯三定律说明，在充电过程中，当充电电流接近蓄电池固有的微量析气充电曲线时，适时地对电池进行反向大电流瞬间放电，以消除电池的极化现象，可以提高蓄电池的充电接受能力，如图 1.8-119 所示。也就是说，通过反向大电流放电，可以使蓄电池的可接受电流曲线不断右移，同时其陡度不断增大，即 α 值增大，从而大大提高充电速度，缩短充电时间。

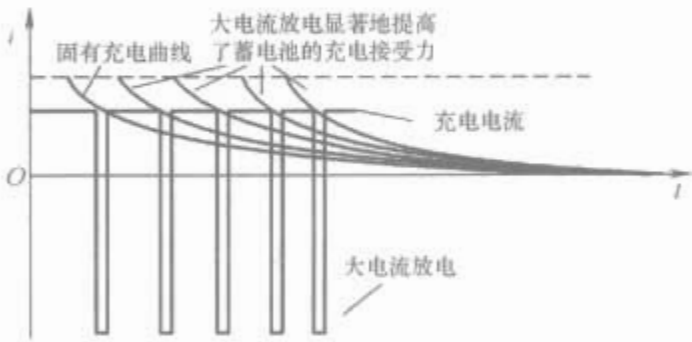


图 1.8-119 快速充电原理图

目前应用最广的脉冲充电、放电去极化快速充电装置就是基于上述原理设计制作的。它也可以细分为：

(1) 定电流定周期脉冲充电、放电去极化快速充电法。如图 1.8-120 所示。

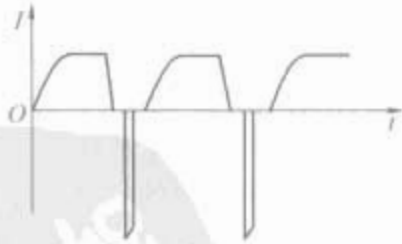


图 1.8-120 定电流定周期脉冲充电、放电去极化快速充电波形

(2) 定电流定出气率脉冲充电、放电去极化快速充电法。

(3) 定电流定电压脉冲充电、放电去极化快速充电法。

目前，电动汽车铅酸电池广泛采用一种多步恒流的充电方式。这种方式的主要特点是它能减少过充，并通过三步分步充电来提高系统的充电效率，如图 1.8-121 所示。

整个充电过程分为四步，即 S1、S2、S3、S4。在 S1 过程的充电率为 $C/6$ ，直到达到冒气电压，然后切断充电电流，使电池端电压下降到预定的电压值 2.2V；S2 和 S3 的充电电流大约为 S1 的 75% 和 50%，一旦达到冒气电压，充

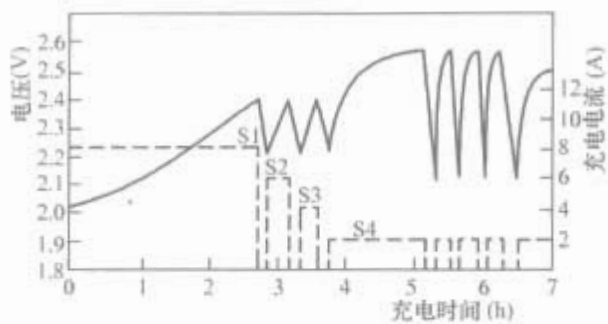


图 1.8-121 铅酸电池的多步充电法

电终止；S4 的充电电流大约为 S1 的 25%，充电过程一直持续到电池电压在 15min 内不再上升为止。当四步主充电过程完成之后，就进入脉冲均衡充电过程：该过程的充电电流大约为 S1 的 25%，当电池电压下降到另一个预定值 2.13V 时，均衡充电过程就开始，该过程一直持续到在 10min 内电池电压没有明显上升。均衡充电过程一共要重复两次，以保证所有的单体电池都被充满，这样可以延长电池的寿命。充电过程的最后阶段是涓流充电，目的是补偿蓄电池的自放电所引起的损失。涓流充电的充电率可以与均衡充电过程相同或者用 C/100 的充电率，只要开路电压低于 2.13V，涓流充电就会开始，此过程一直持续到电池电压在 5min 内没有明显的上升。

7.1.1.2 镍-氢电池、镍-镉电池的充电技术

镍-氢电池、镍-镉电池这两种电池具有相似的特性，其充电方法与铅酸电池的充电方法类似，但也有其自身的特点。就充电方法而言，“热传感法”、“定时法”、“折点电压测量法”是传统的充电方法，镍-镉电池一般采用电压关断控制的恒流充电方式，这种充电方式效率高且简单易行。

镍-镉电池在电池满充时，电池电压会明显上升。图 1.8-122 是电池在 C/10 充电率时的典型充电特性曲线，即电池电压与输入电容量的关系曲线。

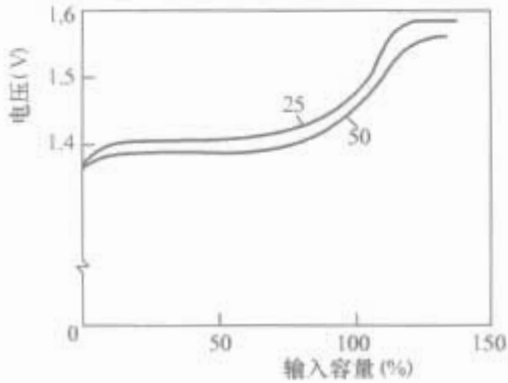


图 1.8-122 镍-镉电池的充电特性曲线

商业用的镍-镉电池充电器通常采用的充电方法为：首先采用 1C 充电率充电，当电池电压达到预定上限 1.5V 时，便停止充电；当电池的开路电压下降到预定下限值 1.36V 时，充电过程重新开始，仍然采用 1C 充电率。此后有规律地重复这个过程，而且该过程重复的频率和每次充电持续的时间逐渐减小，使蓄电池始终保持在一个浮动的 100% SOC 状态。由于温度对充电特性的影响，预定电压值的上、下限应该根据温度影响系数进行调整，此系数值采用 $-4\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。图 1.8-123 显示了这种简单有效的镍-镉电池的充电方法。

镍-氢电池在不同充电率下的典型充电特性曲线如图 1.8-124 所示。

适当的充电控制对于避免镍-氢电池的过充电非常重要，目前常用的三种在过充电之前就能中止充电过程的充电方法分别是电池电压降法 ($-\Delta U$) 或者称为零电压降法 ($0\Delta U$)、温度控制法 (TCO) 和温升控制法 ($\Delta T/\Delta t$)，如图 1.8-125 所示。

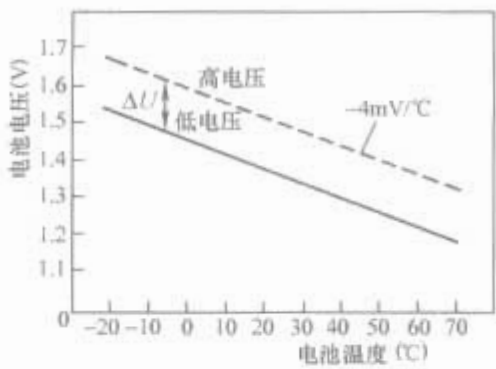


图 1.8-123 镍-镉电池的开关充电法

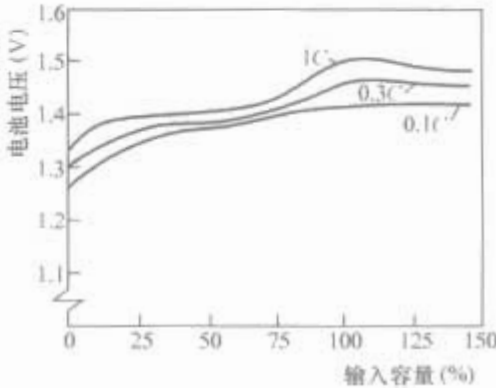


图 1.8-124 镍-氢电池的充电电池特性曲线

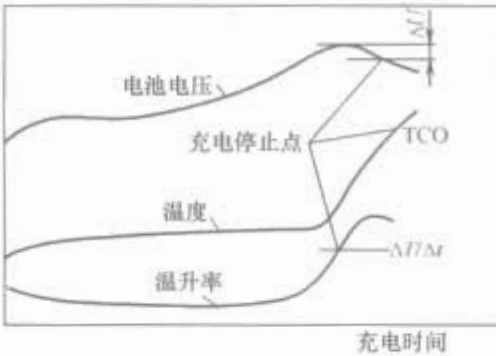


图 1.8-125 镍-氢电池的充电控制方法

镍-氢电池、镍-镉电池充满电前，电池端电压一直在上升，当充满电时，电池端电压开始有微小的下降，这就是镍-镉电池充电过程中的“负电压斜率”特性。利用该特性可以准确地判断出电池充满电的时刻，在该时刻后，电池应转为小电流补充充电。

“负电压斜率法”（包含“零电压斜率法”）是国际上公认的最准确、最安全的充电方法。这种充电方法解决了以往恒流定时充电因电池特性（残余容量、端电压等）不一致造成的难以准确控制充电作业的难题，同时由于充电得到准确控制，因而避免了因充电不足或过度充电造成的“记忆效应”。

由于镍-氢电池对过充非常敏感，所以对充电电流必须加以限制，以避免出现过温升。温升控制法可以消除周围环境温度的影响，并能延长电池寿命。这种方法一般采用 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 作为停止充电的条件。不过这几种方法可以综合在一起使用，以便取长补短。如在 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 时的 $\Delta T/\Delta t$ 的监测就可以与 60°C 时的 TCO 相互补充使用，充电停止之后，可以采用 C/20 充电率的细流充电方式补充镍-氢电池的自放电。

定电流定周期脉冲充电、放电去极化快速充电法技术在这两种电池中也被证明是行之有效的快速充电技术。因此，这两种电池就目前看最先进的充电技术就是采用“定负脉冲斜率+脉冲充电+脉冲放电去极化”充电法。

7.1.1.3 锂离子动力电池充电技术

基本的锂离子动力电池充电技术是采用恒流恒压技术进行充电。在电池充电到额定电压之前，一直采用某一恒定电

流对其进行充电。当电池电压到达额定电压附近时，转为恒压控制，使充电电流逐渐下降到零，从而完成整个充电过程。在此基础上，又发展了一些针对锂离子动力电池的快速充电技术。

(1) 分级定电流充电法。这种方式如图 1.8-126 所示。它是在普通恒流充电方式的基础上发展而来的，即在充电的初始阶段，充电电流维持在一个额定的电流值，直到电池组中单体电池的电压都达到预定的电压值（一般是接近满充时的电压值），每个单体电池中安装的电子控制电路就会分流充电电流，以避免可能的过充，并激活下一个充电过程。接着的充电过程采用较低的恒流进行充电，这个过程不断重复，直到充电电流减小到预定的最小值，再使用最小充电电流充电一定的时间，整个充电过程就可以结束。此外，也可以在中期采用恒压控制，使充电中期时的电流按电池可接受电流曲线规定的斜率递减。

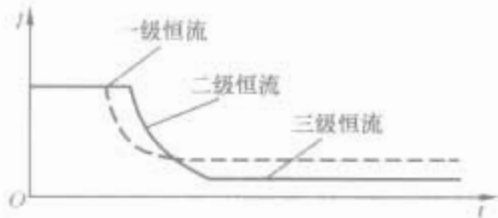


图 1.8-126 分级定电流充电法

(2) 变电流间歇充电。其特点是将恒流充电段改为限压变电流间歇充电段。充电前期的恒电流充电段采用最佳充电电流，获得绝大部分充电量；充电后期采用定电压充电，获得过充电量，将电池恢复至完全放电态，如图 1.8-127 所示。

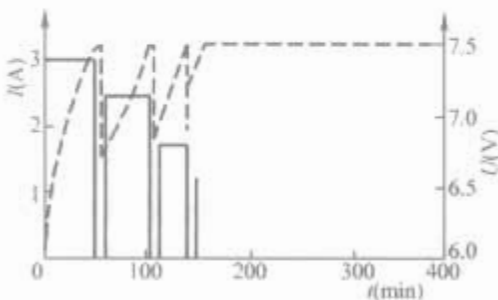


图 1.8-127 变电流间歇充电

(3) 分段定压充电法。这种充电方法是把变流间歇充电中的变流改为变压，通过间歇停充，使蓄电池化学反应产生的氧气有时间被重新化合吸收掉，从而减轻了蓄电池的内压，使蓄电池可以吸收更多的电量。变压充电更符合蓄电池的最佳充电曲线，如图 1.8-128 所示。

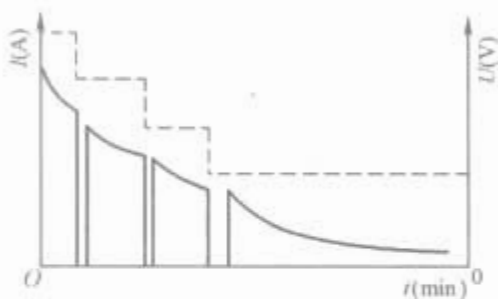


图 1.8-128 分段定压充电法

7.1.2 蓄电池充电器

根据充电器是装在车内还是车外，充电器可分为车载和非车载两种。车载充电器一般设计为小充电率，它的充电时间长（一般是 5~8h）。由于电动汽车车载质量和体积的限制，车载充电器要求尽可能体积小、质量小（一般小于 5kg）。因为充电器和电池管理系统（负责监控蓄电池的电压、温度和荷电状态）都装在车上，所以它们相互之间容易

利用电动汽车的内部线路网络进行通信，而且蓄电池的充电方式是预先定义好的。而非车载充电器一般设计为大充电率，没有质量和体积的限制。由于非车载充电器和电池管理系统在物理位置上是分开的，它们之间必须通过电线或者无线电进行通信。根据电池管理系统提供的关于电池的类型、电压、温度和荷电状态的信息，非车载充电器选择一种合适的充电方式为蓄电池充电，以避免蓄电池的过充和过热。

根据给电动汽车蓄电池充电时的能量转换方式的不同，充电器又可以分为接触式和感应式。前者是将一根带插头的交流动力电缆线直接插到电动汽车的插座中给电池充电，而后者是通过电磁感应耦合的方式进行能量转换而给电池充电的。接触式充电器具有简单高效的优点；而感应式充电器使用方便，而且即使在恶劣的气候环境下进行充电，也无触电的危险。这两种充电器分别适合于户内和户外充电。车载/非车载充电器和接触式/感应式充电器这两种分类方法并不矛盾，原理上车载和非车载充电器都可以是接触式或感应式的。

7.1.2.1 接触式充电器

接触式充电器简单采用插头与插座的金属接触来导电，技术成熟，工艺简单，成本低廉。这种充电器有很多的电路结构可以使用，图 1.8-129 充电器电路 (a) 与 (b) 两者的区别在于是否带有调节装置。图 1.8-130 是一种基于微处理器的充电电路在电动汽车上的实际应用，它对铅酸电池采用多步恒流充电控制。接触式快速充电器可采用类似的电路图，只是充电时不用三相交流电源。

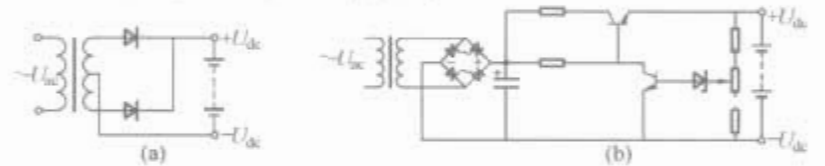


图 1.8-129 充电器电路
(a) 非调节法；(b) 调节法

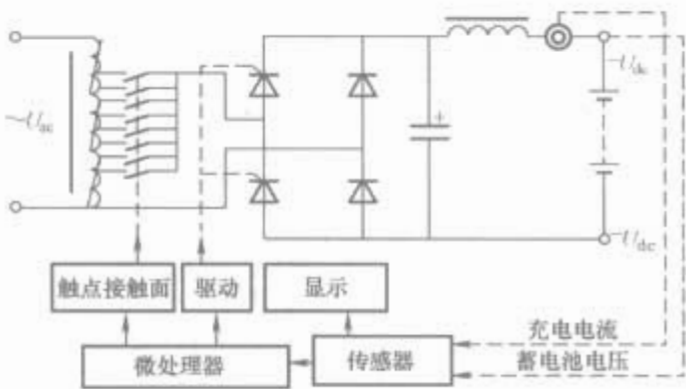


图 1.8-130 充电器电路

图 1.8-131 所示为非车载接触式充电器的典型布置方式，该充电器由一个能将输入的交流电转换为直流电的整流器和一个能调节直流电功率的功率转换器组成，通过把带电

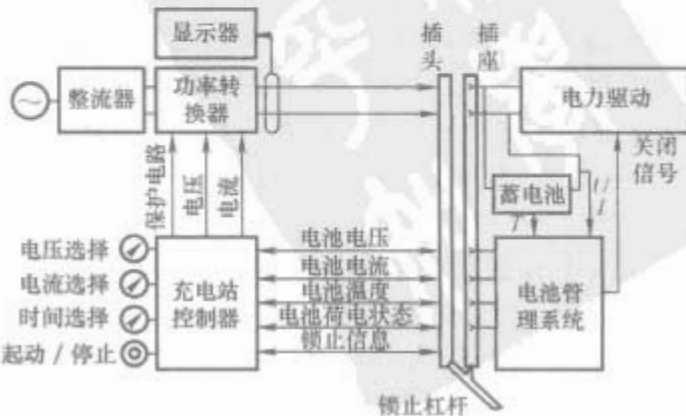


图 1.8-131 布置方案

线的插头插入电动汽车上配套的插座中，直流电能就输入蓄电池对其进行充电。充电器设置了一个锁止杠杆，以利于插入和取出插头，同时杠杆还能提供一个确定已经锁紧的信号，如果没有此信号，充电器就不会给电池充电，以确保安全。根据非车载充电器和车上电池管理系统相互之间的通信，功率转换器能在线调节直流充电功率，而且非车载充电器能显示充电电压、充电电流和充电的电能，甚至所需充电费用等。

根据美国电动汽车协会制定的电动汽车充电器标准 (SAE J1772)，接触式充电器分为三个功率等级，见表 1.8-30，三个功率等级的充电方式及相应的充电电流从根本上可以满足所有电动汽车的充电要求。目前，许多制造商，诸如美国航境 (Aero Vironment) 公司、美国通用 (EVI)、美国福特 (Ford) 和诺维克 (Norvik) 等，都已经开始积极研制符合 SAE J1772 标准的接触式充电器。

表 1.8-30 接触式充电器等级标准		
等级	标 准	充电器参数
1	能够方便地利用墙上的公用插座进行充电	120V 单相交流 15A ^① 最大功率为 1.44 kW 208~240V 单相交流
2	私用或公用，要求使用电动汽车专用的供电设备	30~60A 最大功率为 14.4 kW 208~600V 三相交流
3	安装商业供电设备	400A 直流 最大功率为 240kW ^②

① 插座的额定电流 (最大连续电流为 12A)。
② 标准中所允许的最大值。

7.1.2.2 感应充电器。感应充电器将电能从充电器感应到电动汽车上，以达到给蓄电池充电的目的，如图 1.8-132 所示。利用高频变压器原理，高频变压器的一方绕组装在离车的充电器上，另一方绕组嵌在电动汽车上。充电器将 50~60Hz 的市电转换成 80~300Hz 的高频电，然后将高频交流电感应到电动汽车一方。在整流电路的作用下，将高频交流电变换为能够为蓄电池充电的直流电。由于在充电过程中充电器与电动汽车之间无任何金属接触，使得电动汽车的充电更为安全可靠。感应充电方式相对于接触式充电而言有着明显的优点，它可以在任何天气条件 (包括雨天、雪天或者是

暴风雨的天气) 下安全地进行充电，其主要缺点是投资成本高，而且充电时不可避免地有能量感应损失。

1995 年，美国电动汽车协会颁布了 SAE J1773 标准——电动汽车感应充电方式实用操作规程的建议。该规程特别指明了感应的原方和副方的铁心和绕组，建议使用锰锌铁氧体作铁心材料。该材料制成的铁心在高频 (80~300Hz) 下铁心损失很小，而且磁饱和度大。由于交流电频率太高，因而由绕组表面效应引起的损失也很大，所以感应的原方和副方绕组推荐使用绞合线。绞合线由数股相互绝缘的导线组成，从而可以降低表面效应损失。为减少高频逆变器的开关损失，可以采用软开关技术，如零电流开关技术 (ZCS) 或零电压开关技术 (ZVS)。图 1.8-133 是一种典型的用于感应充电的软开关功率转换器的电路图，ZCS 的增益逆变电路为感应的原方和副方所共用，而传统的整流器则在充电器一方。当感应充电时，蓄电池的电压、电流、温度和 SOC 等有关信息需要传递给非车载充电器，但由于充电器和车之间没有直接的电连接，所以这些信息一般靠无线电波或者微波来传递。

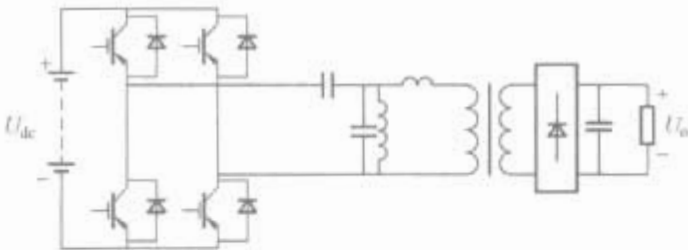


图 1.8-133 软开关功率转换器

电磁充电已应用到电动汽车感应充电器的发展中，其功率范围小到 1kW，大到 120kW。所有充电器的感应连接部分和输入接口都采用 SAE J1773 推荐的标准。除此之外，现在出现了用于电动汽车自动充电的感应充电器。这种泊车自动充电的概念是将感应充电器直接装在泊车位中，从而使驾驶员不再为笨重而危险的充电电线而烦恼。这种充电系统的使用非常简单，只要驾驶员确保将车辆正确地停在车位上，充电过程就会自动启动为电动汽车的蓄电池充电。在法国，这种感应式自动充电系统已经应用，并由普拉克西特 (Praxite) 协会负责监测 [该协会包括国立信息与自动化研究院 (INRIA)、国立运输及运输安全科学研究院 (INRETS)、雷诺 (Renault)、达索自动化和远距通信公司 (Dassault Automatismes et Télécommunications) 及法国电力集团 (EDF)]。

7.2 蓄电池的监测和管理

蓄电池对电动汽车而言是影响整车性能的一个关键因素，它对续驶里程、加速能力和最大爬坡度等性能都会产生直接的影响。由于蓄电池特性的高度非线性，所以设置专门的电池管理系统 (电动汽车) 是非常必要的。根据电动汽车所采用的电池的类型和动力电池组的组合方法，电池组能量管理系统主要包括：①热 (温度) 管理系统；②电池组管理系统 (电动汽车)；③电线线路管理系统。电池组能量管理系统见表 1.8-31。

表 1.8-31 电池组能量管理系统	
能量管理系统	系 统 结 构
热 (温度) 管理系统	电池组组合方式
	电池组分组和支架布置
	通风管道系统和风扇
	温度管理 ECU 及温度传感器
	热能的管理和利用

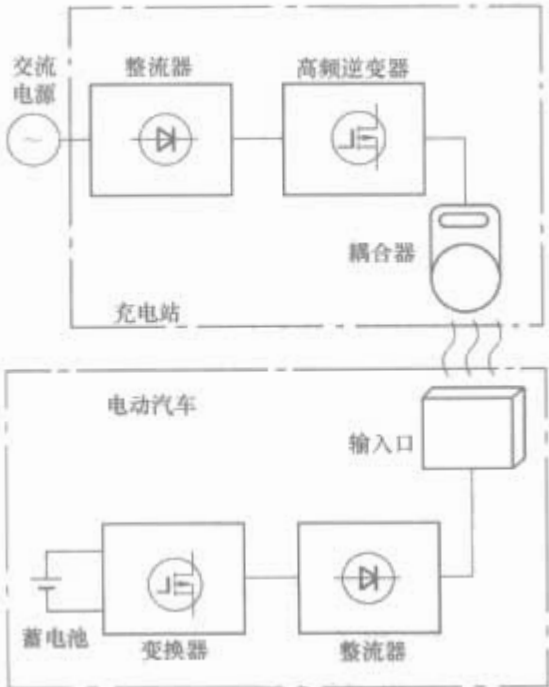


图 1.8-132 感应充电器的充电原理

续表

能量管理系统	系 统 结 构
电池组管理系统	电池组电压测试
	电池组电流测试
	电池组合单元电池的管理测试
	SOC 计算及显示技术
	电池组剩余电量显示
	车辆在线可行使里程显示
电线线路管理系统	自动诊断系统和报警系统
	安全防护系统
	动力电池组分组及连接
	动力电电线束
	手动或自动断电器
	传感器的类型
	传感器电线束

7.2.1 热管理系统

通用汽车公司 EV 上使用的动力电池组在工作时都会有发热现象，不同的蓄电池的发热程度各不相同，有的蓄电池可以采用自然通风满足电池组的散热要求，但有的蓄电池则必须采取强制通风来进行冷却，才能保证电池组正常地工作和延长蓄电池的寿命。另外，在 EV 上，由于动力电池组的各个电池或各个分电池组布置在车架不同的位置上，所以各处的散热条件和周围环境都不同，这些差别也会对电池充、放电性能和电池的使用寿命造成影响。为了保证每个电池都能有良好的散热条件和环境，将动力电池组装在一个强制冷却系统中，使各个电池的温度保持一致或相接近，以及各个电池的周边环境条件相似。

根据动力电池组在电动汽车上的布置，在动力电池组的温度管理系统中，首先应合理安排动力电池组的支架，要求动力电池组或其分组能够便于安装，能够实现机械化装卸，便于各种电线束的连接。在动力电池组支架的位置和形状确定后，设计通风管道、风扇，动力电池组 ECU 和温度传感器等，一般有两种方式布置温度管理系统，即水平方式和垂直方式。水平布置的温度管理系统如图 1.8-134 所示，垂直方式温度管理系统如图 1.8-135 所示。

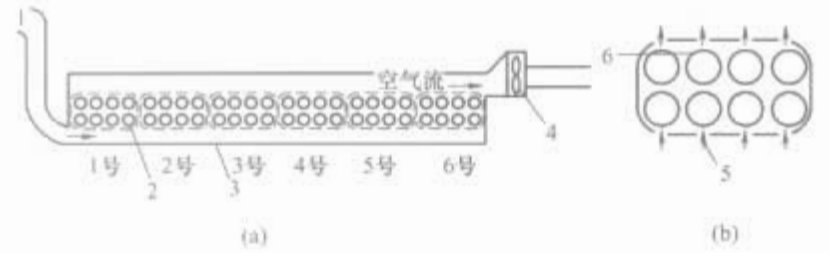


图 1.8-134 水平方式的温度管理系统

(a) 动力电池组的强制通风系统及动力电池组布置；
(b) 分组电池组的局部通风情况

1—空气吸入管道；2—分电池组；3—动力电池组密封支架；
4—冷却风扇；5—分电池组冷却系统；6—温度传感器

7.2.2 电池组管理系统

电池组管理系统（电动汽车）一般由一些传感器（用于测量电压、电流和温度等）、一个带微处理器的控制单元和一些输入/输出接口组成。电动汽车最基本的作用是监控电池的工作状态（电池的电压、电流和温度），预测蓄电池的 SOC 和相应的剩余行驶里程，管理电池的工作情况（避免出现过放电、过充、过热和单体电池之间电压严重不平衡现象），以便最大限度地利用电池的存储能力和循环寿命。电

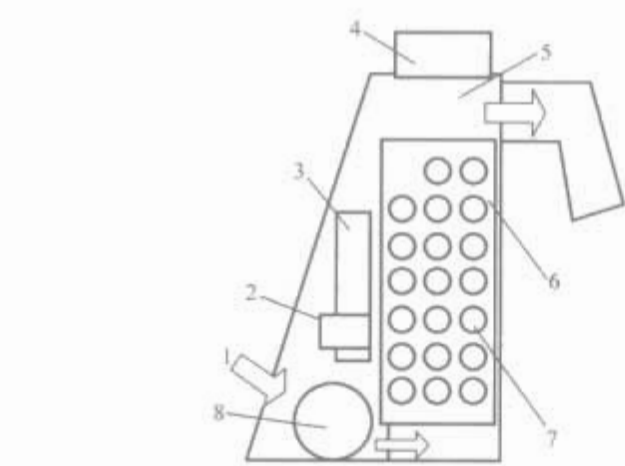


图 1.8-135 垂直方式的温度管理系统

1—冷却空气吸入管道；2—温度传感器；3—电池组管理器 FCI；4—充电器；5—电池组通风箱；6—单元蓄电池；7—分电池组；8—风扇

动汽车电池组管理系统的主要任务及相应的传感器输入和输出控制见表 1.8-32。

表 1.8-32 电池组管理系统的主要任务		
任 务	传感器输入的信号	执行器件
防止过充	电池电压、电流和温度	充电器
避免深放	电池电压、电流和温度	电机功率转换器
温度控制	电池的温度	冷、热空调
电池组件电压和温度的平衡	电池电压和温度	平衡装置
预测电池的 SOC 和剩余行驶里程	电池电压、电流和温度	显示装置
电池诊断	电池电压、电流和温度	非在线分析装置

7.2.2.1 SOC 计算及预测

SOC 显示器的主要功能是给驾驶员提供关于蓄电池剩余能量的准确信息，从而让驾驶员可以在再充电之前计划好剩余行驶里程。几种可用的 SOC 算法为相对密度法、开路电压法（OCV）、恒定电流电压法、安培小时法等。

(1) 相对密度法。有些蓄电池电解液相对密度的变化取决于电解液浓度的变化，相应地会引起 SOC 的变化，相对密度法适合于测量这些蓄电池。电解液的相对密度一般用液体密度计来测量，尽管这种方法在估计 SOC 时具有合理的精度，但当蓄电池连续工作或蓄电池密封时就无法使用这种方法了。由于电解液的扩散速度非常慢，蓄电池在充电或放电后需要很长时间才能稳定，只有在蓄电池稳定后才能用这种方法来测量。

(2) 开路电压法（OCV）。这是一种简单方便的方法，但是只适用于 OCV 随 SOC 变化明显的蓄电池。图 1.8-136 则是锂离子电池在 C/10 放电率下的 OCV 和 SOC 之间的非线性关系曲线。这种测量方法的主要缺点在于蓄电池在充电或放电之后，OCV 需要很长的时间才能稳定（一般是 12h）。

(3) 恒定电流电压法。假定负载电流不变，则负载电压与 OCV 成正比，由此可以估计电池的 SOC。但恒流的条件对于电动汽车变化的负载而言就不实用了。

(4) 电量积累法（很多芯片提供该种电量计算的功能）。通过累积电池在充电或放电时的电量来估算电池的 SOC，并根据电池的温度、放电率对电池进行补偿，以安培小时筒

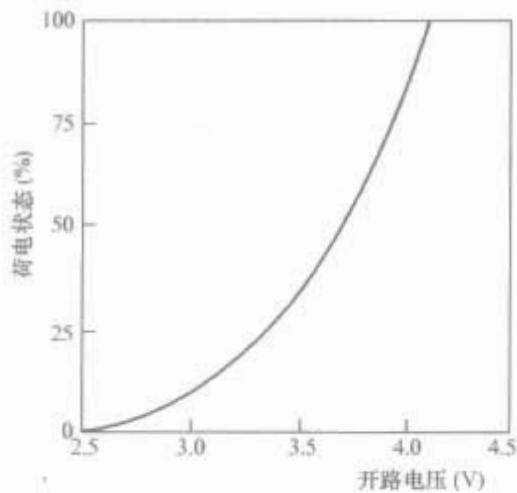


图 1.8-136 锂离子电池的 SOC 与 OCV 关系曲线图

单计算出从蓄电池输出的能量或者输入蓄电池的能量。只要由 Peukert 方程表示的被测蓄电池的总容量已知，就可以用这种方法来计算电池的 SOC。这种方法对蓄电池 SOC 的短时估计而言具有合理精度，但它未对电池的老化和循环寿命进行补偿，没有考虑放电电流对容量的影响具有可恢复性，以及充放电效率具有不稳定性等因素。

(5) OCV 法与安培小时法联合预测法。由于 OCV 法对于测试稳定状态下的 SOC 有很高的精度，而安培小时法在短时测量时有很高的精度，因此可以综合利用这两种方法。这种综合方法就是当电池在工作时采用安培小时法来测量蓄电池的 SOC 时，相应的总误差由 OCV 法有规律地进行补偿。图 1.8-137 具体说明了这种方法的原理。不过，这种有规律的补偿很大程度上取决于电池电压的稳定时间，实际上，绝大部分电池的 OCV 的稳定时间至少需要 12h。图 1.8-138 表示某种典型的铅酸电池在不同的 SOC 下放电后的 OCV 的恢复特性曲线。最近新发展了一种方法来预测铅酸电池放电后在 5min 稳定期内的 OCV。5min 预测法实质上是使用两条对数渐近线来近似电池放电后的恢复特性，这种方法基于在稳定后的第 1 分钟和第 5 分钟对电池进行的两次测量。但是，由于电动汽车在实际运行中经常制动刹车，利用再生制动能量给蓄电池充电，因而这种方法不能进行精确的预测。

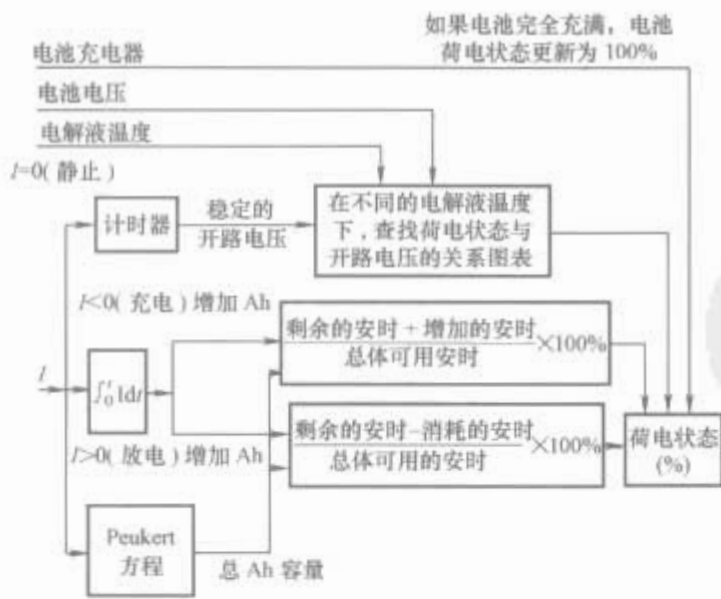


图 1.8-137 指示 SOC 的综合方法

(6) 利用神经网络预测。这种方法直接确定蓄电池的有效容量 (BAC)，而不是电池的 SOC，专门用于测量电动汽车的蓄电池。它利用神经网络和模糊逻辑学原理，将电池变化的电流状况、温度及老化等因素全部考虑在内，从而大大提高了 BAC 的估测精度。而且这种方法有利于电动汽车的实时应用。

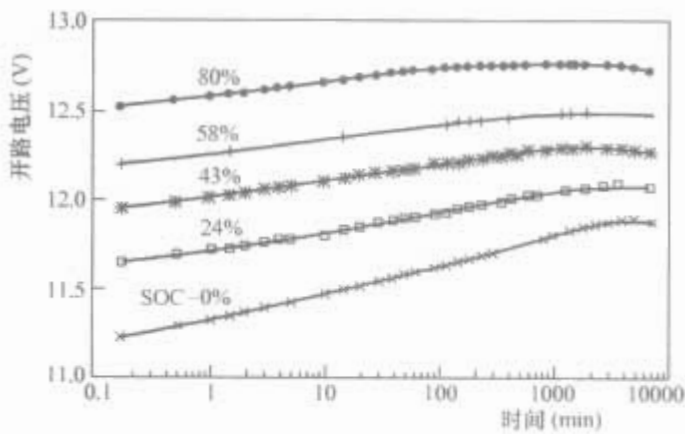


图 1.8-138 铅酸电池在不同的 SOC 下放电后的 OCV 的恢复特性曲线

7.2.2.2 剩余能量和剩余行驶里程的预测

除了蓄电池的 SOC 显示器之外，还有其他许多电池显示器利用了 SOC 的有关信息，尤其是驾驶员最为关心的剩余能量和剩余行驶里程的预测。SOC 和剩余能量显示仪的作用与燃油车燃油表的作用类似，因为它们分别显示电动汽车蓄电池的有效容量和剩余能量。剩余里程显示仪可以预测电动汽车所储存的能量用完之前能够继续行驶的里程。剩余行驶里程在很多程度上取决于驾驶员的驾驶习惯和路况，因此，剩余里程显示仪只能提供短时间内的估计。

如果电池的总容量已知，根据所显示的 SOC 就很容易计算出剩余容量。蓄电池的剩余能量就可以用电池的剩余容量与电池的平均电压相乘得到（平均电压是瞬时电压与截止电压的平均）。最后，根据电动汽车预先设定的能量消耗参数就可以估算出行驶里程。一般能量消耗参数由最后 5min 内单位能量消耗的行驶距离来表示。通过在线修正参数，剩余行驶里程显示仪就可以进行较准确的短期预测。

电动汽车蓄电池的各种显示装置，如 SOC 显示器、剩余能量显示器和剩余里程显示器，随着微电子器件，如微处理器、微控制器和内存等的改进而不断发展。

电动汽车电池管理系统还具有获取蓄电池充放电过程中的所有操作数据的功能，并将这些数据传到如 PC 机等外部设备中，以供非在线分析和诊断。这个功能使得给不同的电池模块建立一个综合性的数据库成为可能。依靠在线监测蓄电池的电压和电流，合适的电池管理装置使电动汽车具有防止电池过电流放电（放电电流大于最大允许放电电流）、欠电压放电（放电过程中电池电压低于截止电压）、过电流充电（充电电流高于允许的最大充电电流）和过电压充电（充电过程中电池电压高于发泡电压）的功能。这些限定值一般随着电池类型、电池样式、充放电电流、工作温度和电池老化程度的不同而有所变化。因此，需要进一步研究和开发，以改善需蓄电池的设计和建模，尤其应改善温度和老化对电池的影响。

电动汽车电池管理系统可以解决电池的显示和管理工作。实际上，这两项任务需要相同的传感器输入信号（即电池电压、电流和温度），但所完成的任务不同。蓄电池显示器应提供蓄电池的 SOC，剩余能量或剩余行驶里程的预测，而蓄电池的管理装置则具有保护和诊断蓄电池的作用。如镍氢电池和锂离子电池等先进电池，如果过充或者因为单体电池之间能量不均衡造成过充，都会引起电池的永久性损坏。

7.3 蓄电池的均衡管理

为了能够提供足够的电压，电动汽车上的动力电池一般都是由几组电池包串联使用，而每组电池包又是由多块电池单体串联而成，各单体电池之间存在不一致性。电池的不一

致性是指同一规格、同一型号的电池，其电压内阻容量等方面参数的差别，电压是不一致性最为直观，也最容易测量的表现形式。电池的不一致性使电池容量的不匹配包括充电状态（SOC）失配和容量/能量（C/E）失配。在这两种情况下，电池包的总容量都只能达到最弱电池的容量，在对电池进行充放电时，容易导致电池的过充或过放，因此必须给电池附加均衡电路。

图 1.8-139 中的均衡器实际上是一个双向 DC-DC 变换器，在电池组 E_1 和 E_2 之间接均衡器 1，可使 E_1 和 E_2 均衡；在电池组 E_2 和 E_3 之间接均衡器 2，可使 E_2 和 E_3 均衡，同时也达到了 E_1 和 E_3 均衡的目的，这样两个均衡器可实现 3 个电池组间的均衡，以此类推，采用 $n-1$ 个均衡器可对 n 个电池组进行均衡。

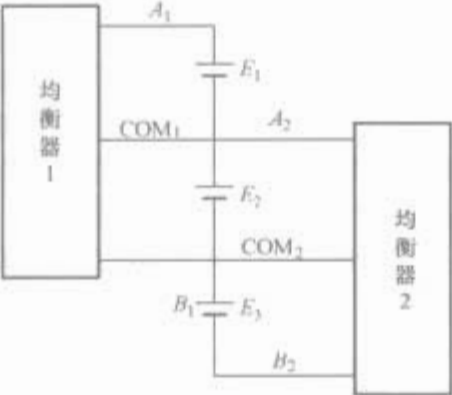


图 1.8-139 能量均衡示意图

能量均衡电路按照能力存储方式可大体分为飞渡和能量变换器法两大类。从均衡电路的拓扑角度看，可以分为集中均衡和分散式均衡两种。集中式均衡是 n 个电池采用一个均衡器，或者说均衡能量的来源取自同一处。分散均衡就是 n 个电池组采用 $n-1$ 个均衡器进行均衡。

7.3.1 飞渡电容法

(1) 集中式。如图 1.8-140 所示。这种结构的优点是：使用单只电容器循环均衡可以直接对最高和最低电池进行均衡。缺点是：需要大量的开关元件，开关上瞬间开启电流很大，易出现电弧或电磁干扰，开关触点压降直接影响均衡效果。

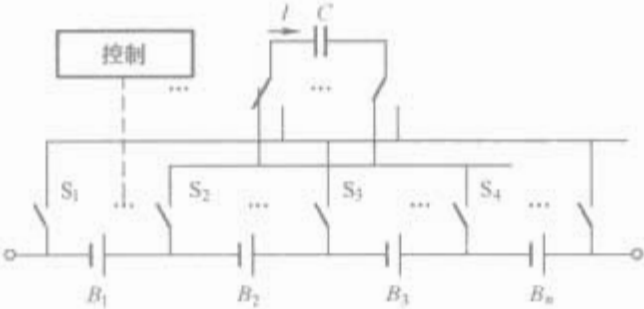


图 1.8-140 飞渡电容集中式

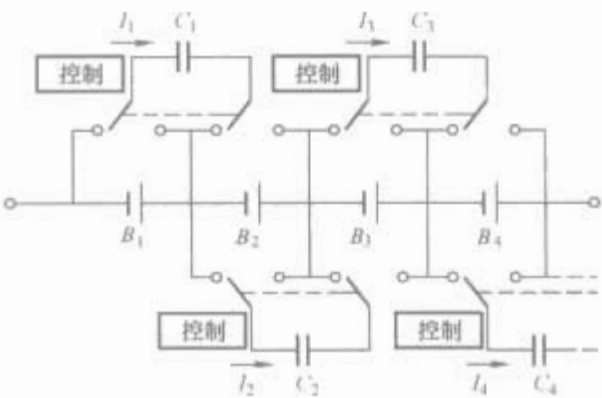


图 1.8-141 飞渡电容分散式

(2) 分散式。如图 1.8-141 所示。这种结构的优点是：电容、控制电路及其所均衡的两相邻电池易于集成在一个电

池包内，均衡单元可以按照电池数量任意扩展。缺点是：均衡属于能量依次传递方式，均衡时间可能较长。

7.3.2 采用能量变换器

这种充电电路的好处是属于储能式能量均衡电路，无能量损失，并且能量的均衡是自动完成的，无需额外的开关电路和复杂的检测控制电路。

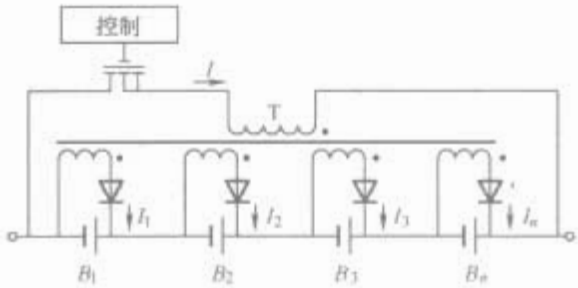


图 1.8-142 能量变换器集中式方案

(1) 集中式。如图 1.8-142 所示。该电路通过整组电池抽取能量，并将这部分放出的能量经过能量的转换，通过独立地充电，为能量低的电池补充能量；其基本原理是基于均衡能量平衡方程

$$I_{dis}U_{dis} = \sum_{i=1}^n I_{chr}U_{chr}$$

在忽略电池充放电效率区别的前提下，对于放电电流等于充电电流的单体电池，放电能量将等于充电能量；对于放电电流小于充电电流的单位电池，放电能量将小于充电能量，能量将不断增加；对于放电电流大于充电电流的单位电池，故电能量将大于充电能量，能量将会不断减少，最终各电池单位能量趋于一致。

这种结构的优点是各电池的充放电电流大体与其充放电能量保持动态平衡；在放电均衡过程中，尽管所有电池的放电电流相同，但是剩余能量高的电池由于电动势高，实际放出的能量也多，即该电池的放电能量所占的比例就越高，即与其 SOC 成反比，无需闭环控制。

缺点是复杂的磁技术，元件数量多；均衡电路二次绕组数量设计必须与电池最大可能数量一致，不易扩展；低压绕组到各单体之间的导线长度和形状不同，变比有差异，均衡误差大；变换器与电池组之间的 $n+1$ 条功率导线的布线工艺不容易设计，车辆行驶过程中对导线的拉伸和剪切会给安全带来隐患。

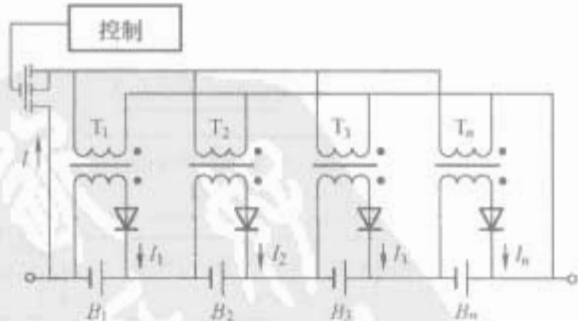


图 1.8-143 能量变换器分散式方案

(2) 分散式。如图 1.8-143 所示。这种结构的优点是每个单元都有单独磁心，易于实现扩展；缺点是磁心数量多。

如果电池电压均衡利用能量变换装置实现，依据高频开关电源的原理和技术设计，基本的电源电路包括非隔离式的 Buck、Boost、Buck Boost、Cuk、Sepic、Zeta，隔离式的有 Forward、Flyback、Push Pull、Half Bridge、Full Bridge、Iso-Cuk 等。充电时，小容量电池充入较少能量，分流电路吸收电能；放电时，分流电路补充能量，能量变换器应该实

现双向变换。原则上各种电源电路经改进设计都可以实现双向，最简单的方案是用两个电源，输入与输出交叉并联，两个电路分别控制。由于受成本、体积和质量、长期工作的可靠性等因素的影响，双向单变换器比单向双变换器更有优势，是发展方向。

7.4 温度控制单元

与燃油车一样，电动汽车也应给驾驶员提供舒适的车内环境，但是传统燃油车的温控装置一般要消耗大量的电能（约2~4kW），如果电动汽车采用这样的能耗值，就会大大减少其续驶里程。为了不降低电动汽车的续驶里程，而又能给驾驶员提供一个舒适的车内环境，人们正在开发专用于电动汽车的调温装置。

7.4.1 电动汽车空调器

目前传统的燃油车空调器同时具有制冷和加热能力。制冷装置由发动机驱动的压缩机、外部热交换器（冷凝器）、内部热交换器（蒸发器）和膨胀阀组成，而加热装置则直接利用发动机冷却水的废热来加热散热器的中部，用一个合适的温度控制程序就能完成车内温度的调节和给挡风玻璃除霜的功能。但传统的空调器能量消耗大，会严重影响电动汽车的续驶里程。而且电动汽车没有发动机的废热可以利用，即电动汽车内的空气加热也必须由空调装置完成。因此，电动汽车的空调器必须专门设计，使之同时具备制冷和加热功能，而且两者的能量利用率都要高。

考虑到电动汽车的特点，其空调器应该效率高、结构紧凑、质量小、成本低、噪声低、能在各种气候条件下工作。图1.8-144是一种新开发用于电动汽车的空调器的结构原理图，它由压缩机、内部热交换器（蒸发器）、膨胀阀、外部热交换器（冷凝器）、内部风扇、外部风扇和控制单元组成。

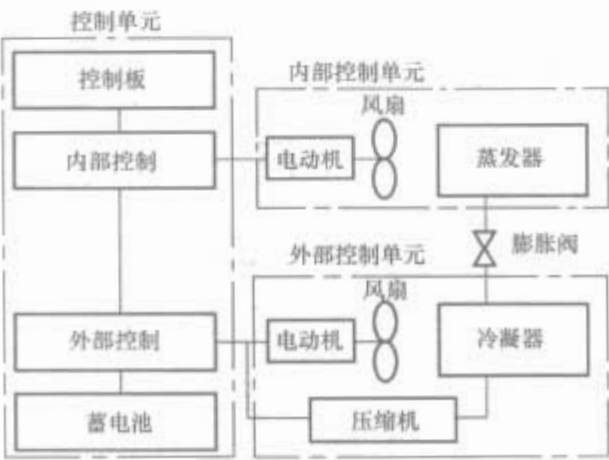


图 1.8-144 电动汽车空调器原理

为了满足上述要求，需采取下列先进技术：

交换器——由于燃油车的空调器只用作制冷，所以车内外热交换器上就不会结霜，因而热交换器就可以采用具有良好热传导性的、带翼片的扁平管。但是电动汽车上的空调器加热时热交换器上就可能结霜，为避免结霜，翼片管状的热交换器应用圆形管代替，从而可以提高除霜效率。此外，还可以同时采用V形切口的翼片管和波浪形的翼片管来增加热传导。

风扇驱动电机——尽管内、外风扇的功率都只有100W，但减少其能量损失，在一定程度上也能提高电动汽车的续驶里程。因此，风扇采用带逆变器的永磁无刷变速电机驱动，为了使总体结构更加紧凑，也可以把单片低功率的逆变器直接嵌在驱动电机里。

压缩机——与旋转式压缩机相比，采用涡轮压缩机可以

大大减少工作时的噪声和振动，从而提高其可靠性，而且水平放置的涡轮式压缩机利于安装。

压缩机的驱动电机——压缩机的驱动电机给涡轮式压缩机提供驱动力。为了达到工作时的效率高，驱动电机采用由逆变器驱动的永磁无刷电机，因而整体效率可超过80%，电机通常高速运行（一般超过7000r/min）。

控制单元——为了有效地控制整个空调器的温度，采用分布式微控制器来控制风扇和压缩机的电机转速、监测温度、选择运行模式、管理数据、进行系统保护和显示等，其控制图如图1.8-145所示。

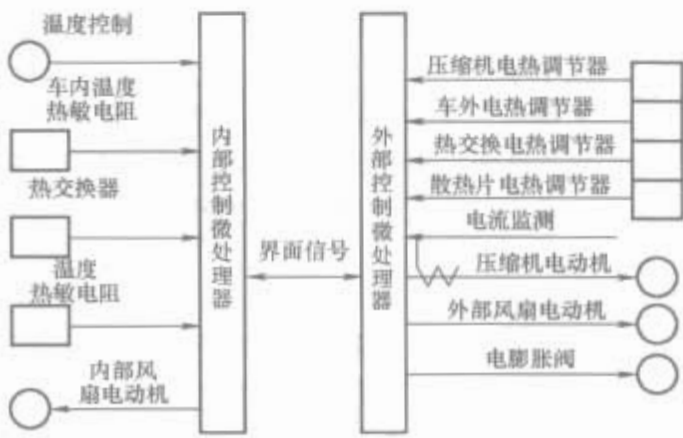


图 1.8-145 电动汽车空调器的控制示意图

制冷剂——空调器的制冷剂采用HFC R-407C，它不会破坏臭氧层，而且其制冷和加热能力比传统的制冷剂更有效。

这种电动汽车空调器不仅能有效地调节车内温度，而且能高效地为挡风玻璃除霜。但当电动汽车在低于0℃的气温下行驶时，这种空调器不具备足够的加热能力。当气温降到-20℃时，辅助电加热器就会与空调器同时工作，以增加总加热能力。另外，人们还提出了一些先进的热力学技术使电动汽车的空调器能够在-20℃的情况下有效工作，例如，Denso已经在电动汽车空调器中采用一种气体喷射技术，它能使空调器的加热能力提高30%，效率提高20%。

7.4.2 电热式变温座椅

空调器应用在电动汽车上的最大缺陷就是能耗太大，一般一台车用空调所消耗的功率为2~4kW。最近人们提出了一种新想法，就是直接对乘客身体加热或制冷，而不是调节整个车内的空气。图1.8-146是Amerigon所使用的一种电热式变温座椅，它由一个热电泵、一个吹风机和两个高压线圈组成。温度的调节是通过座椅和靠椅处与乘客的身体直接产生热传导，以及从座椅表面散发出的调温后的空气的对流来实现的。制冷和加热作用是由装在座椅内部的热电泵和吹风机实现的，控制模块装在座椅的侧面，它能调节温度、风

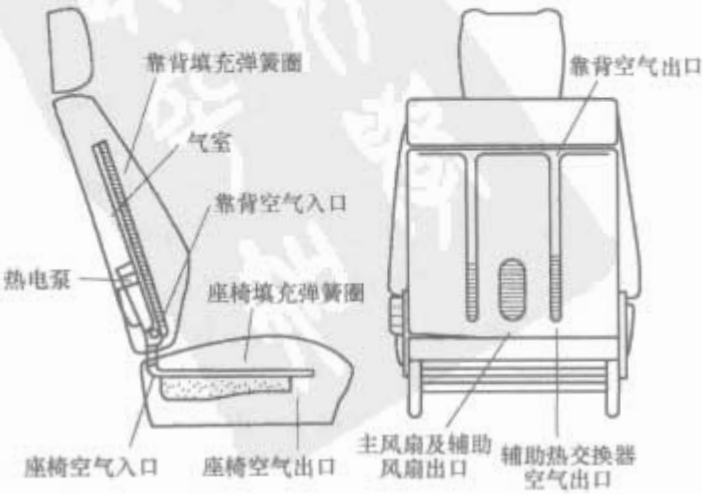


图 1.8-146 电动汽车变温座椅示意图

扇转速和气流方向。最近，HKU U2001 电动汽车也安装了电热式变温座椅，每个座位只消耗 100W 的能量。

7.5 动力转向系统

一辆机动车辆要完成的基本功能有行驶、停车和转向。行驶是由驱动系统支配，是车辆的主要功能；而停车由制动系统来支配；转向与行驶和停车一样重要，由转向系统控制。早期动力转向系统主要应用于大型机动车，如卡车和公共汽车，帮助驾驶员克服转向困难。随着汽车工业的发展，动力转向系统后来也逐渐应用于小型车辆，以提高驾驶的舒适性。现在动力转向系统已经成为燃油车的一个标准配置，它的应用已经大大提高了机动车的驾驶性能。

与燃油车类似，电动汽车一般也配置动力转向系统，以提高汽车的驾驶性能，相应的动力转向系统必须符合高效率利用能源的要求。电动汽车使用的动力转向系统主要有两种形式：电液式和电动式。

7.5.1 电液式动力转向系统

在传统的燃油车中，通常使用由引擎驱动的液压泵来实现动力转向。它的液力泵都随着发动机的旋转而旋转，并且与转速成正比，结果导致了能量的浪费。据计算，在燃油汽车的总能耗中，有 3% 是被这种液压泵式的动力转向系统消耗了的。为了减少动力转向系统的能耗，电动汽车中的电动液压泵的驱动动力不是来自于主动力驱动电机，而是来自于独立的驱动电机。图 1.8-147 显示的是电动汽车用的电动液压式（也可以叫做电液式）动力转向系统的结构简图，它的高效齿轮泵由高级电机驱动，如感应电机、永磁无刷电机、开关磁阻电机等，转向齿轮与传统的液力转向系统相当，逆变器由一个辅助电池供能。基于这样的电液式动力转向系统，液压泵就可以在车辆直线行驶时低速运行或者停止运行，而当车辆转向时，通过它的高速运转来提供动力实现动力转向。目前，许多现代电动汽车都采用这种电液式的动力转向系统。

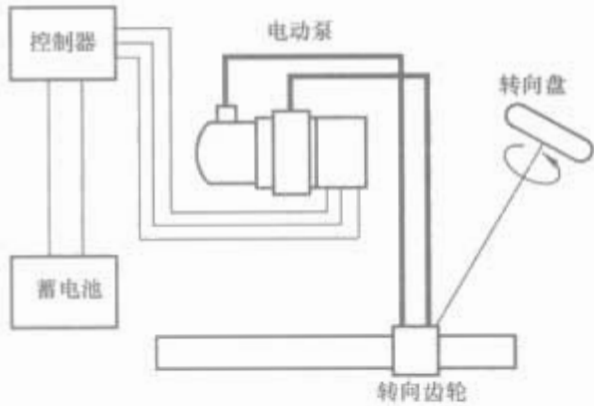


图 1.8-147 电液动力转向机构的示意图

7.5.2 电动式动力转向系统

电力直接驱动（简称电动式）动力转向系统取消了液力泵，而是直接用一个电动机来产生转向力矩。图 1.8-148 显示了这种电动式动力转向系统的结构简图，主要由电动机、力矩传感器、控制器和减速齿轮组成。可靠性很高的力矩传感器负责感知转向力，从而可以使电动机根据转向要求产生合适的转向力矩。基于力矩传感器信号和车速信号，控制器就可以对电动机进行恰当的控制。减速齿轮用来放大电机输出的力矩，并将力矩传到输出轴上。电机及其逆变器由辅助电源供能。一些最新的电动汽车上就安装了这种电动式动力转向系统。

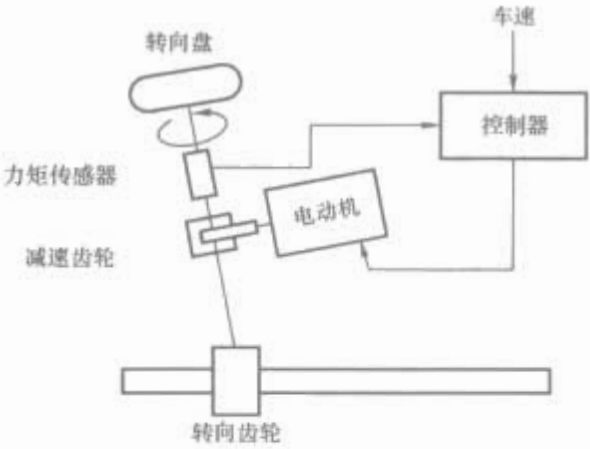


图 1.8-148 电力动力转向机构示意图

7.6 辅助动力源

辅助动力源主要由一个辅助电源和一个 DC-DC 功率转换器组成，其主要功能是：即使当主能源（如主电源）完全放完电或者不能正常工作时，仍能为电动汽车的基本辅助子系统提供稳定的动力。现代电动汽车由许多子系统组成，如空调器、收音机、主控制器、EMS、喇叭、车灯系统、动力转向系统、液压制动或气动制动、电动汽车窗、化霜器和雨刷等。图 1.8-149 对燃油车和电动汽车的辅助子系统作了比较，两者的主要区别在于，燃油车的辅助电源由与发动机相连的交流发电机来充电，而电动汽车的辅助电源则由主电源通过 DC-DC 转换器来充电。在传统的燃油车中，所有这些辅助子系统只用一个 12V 的辅助蓄电池供电。但是由于电动汽车辅助子系统的能量消耗比燃油车大，为了节约能量，对于那些功率大的子系统，要采用较高的电压供电。因此，电动汽车辅助电源的电压等级除了常规的 12V 之外，还要采用 24、48V 甚至 120V。这使得电动汽车的辅助电源系统比燃油车更为复杂。



图 1.8-149 燃油车和电动汽车辅助设施的比较

各种辅助子系统的功耗见表 1.8-33。从表中可以看出，空调器是电动汽车辅助子系统中功耗最大的子系统，它的功耗大约占所有辅助子系统功耗的 60%~75%。为了减少空调器的损耗，通常采用 120V 的电压等级供电。此外，为了避免辅助电源的能量在短时间内耗尽，大功率的子系统，如空调器、动力转向系统、液压制动或气动制动和化霜器等，应当只有在接触器闭合时才能工作，这样可以直接从主电源中获取所需的动力。

表 1.8-33 电动汽车辅助子系统的功耗

子系统	工作状态	功耗 (W)
空调器	连续	2000~4000
收音机	连续	20
接触器	连续	20
驱动控制器	连续	150
能量管理系统	连续	150
车头灯和尾灯	连续	120
喇叭	断续	10
仪表	连续	30
停车灯、转向灯及车内灯	断续	50
动力转向系统	连续	400
液压制动或气动制动	连续	1500
电动汽车窗	断续	80
车窗化霜器	连续	250
雨刮器	连续	40

7.6.1 辅助电源

除空调器、动力转向、液压制动或气压制动和化霜器之外，其他子系统的能耗大约为 700W。即使主电源完全放电或者 DC-DC 转换器出现故障，辅助电源也应该能提供这些能量消耗，以确保车辆行驶的安全性和可靠性。辅助电源的容量通常确定为在紧急负荷下连续工作 1h 的能量储存量。使用辅助电源的另一个好处是可以防止电动汽车辅助子系统的电压波动及由电力驱动而引起的电磁干扰污染。

7.6.2 DC-DC 转换器

适用于电动汽车辅助子系统能量供给的两种基本的 DC-DC 转换器（非绝缘型和绝缘型）如图 1.8-150 所示。这两种 DC-DC 转换器的工作效率都很高，一般为 85%~95%，并且适于商用。非绝缘型结构简单和成本低，而绝缘型则能将主电源的高等级电压与辅助电源的低等级电压隔离开来。

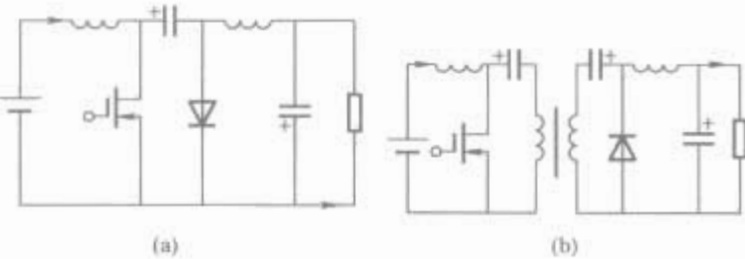


图 1.8-150 用于电动汽车辅助设施的回扫 DC-DC 变换器
(a) 非绝缘型；(b) 绝缘型

辅助的 DC-DC 转换器具有两个功能：一是对辅助电源充电直到满充为止；二是为大功率子系统提供动力。图 1.8-151 是电动汽车辅助子系统的典型负载循环图及相应的 DC-DC 转换器的优化容量。优化容量表示电池的充电和放电过程能够相互平衡，而且辅助电源一直保持满充状态。如果选择更大的容量，则充电过程就比放电过程占优势，就会导致 DC-DC 转换器尺寸过大或者出现辅助电源过充的问题；

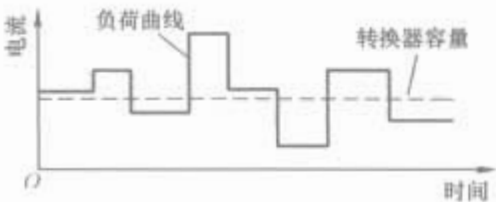


图 1.8-151 最佳 DC-DC 变换器容量

如果选择小一点的容量，则电池的放电过程就比充电过程占优势，这将会导致辅助电源在紧急情况下使用时失去满充状态。

7.7 导航系统

现代燃油车的导航系统可以帮助驾驶员找到到达目的地的最近路线，并且避开交通堵塞地段，因而它变得越来越吸引人。电动汽车上的导航系统可以与 EMS 协同工作，帮助电动汽车发现最近的充电站，计划能量的使用，以及确定最经济的行驶路线。一般电动汽车采用两种导航系统：局域导航和全球导航。

7.7.1 局域导航

Amerigon 开发的一种用于电动汽车的局域导航系统采用的是声控导航系统，采用 CD 光盘驱动器制成的廉价声控路径指示器，以驾驶员的声音作为输入，而光盘中存储的声音则作为输出。驾驶员告诉导航系统自己现在所处的位置及要去的目的地，然后系统将根据从事先刻录在 CD 盘上的地图，计算出最佳的路线并指示驾驶员如何行驶。这种声控导航系统的优点是驾驶员在驾驶车辆时可以不必将注意力离开道路去操纵复杂的系统。系统的结构框图如图 1.8-152 所示。HKU U2001 电动汽车就是采用这种系统进行导航。

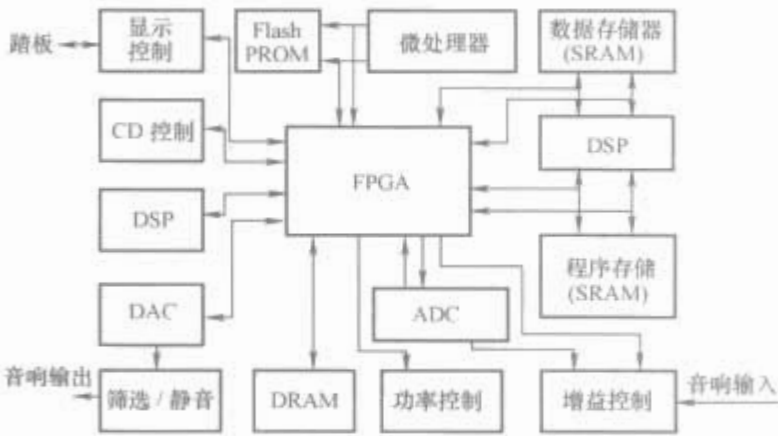


图 1.8-152 语音导航系统结构框架图

7.7.2 全球导航

局域导航系统需要驾驶员粗略估计汽车所在位置，而全球导航系统采用全球定位系统（GPS）来自动确定汽车的精确位置。GPS 根据四颗人造卫星发射的信号，可以计算出汽车的三维位置和时刻。根据汽车的精确位置、匹配的地图和当前的交通信息，全球导航系统制定出交通堵塞最少且最节能的路径，并协同 EMS 一起准确地计算出剩余行驶里程。随着全球导航系统的出现，电动汽车续驶里程短这个主要的缺点有望得到缓解。

GPS 导航系统一般由 GPS 接收器、GPS 天线、导航计算机、光盘驱动器、显示器和扬声器组成。驾驶员可以将宾馆、机场、医院、旅游胜地、公共充电站，甚至个人的住址等输入计算机，编程为最佳路线。一旦确定好路线，它可以用声音提示并通过画面显示，一步一步地指导驾驶员到达目的地。GPS 系统的体积设计得很紧凑，利于安装。目前一些高科技公司，如美国洛克韦尔（Rockwell）自动化控制系统有限公司、飞利浦（Philips）和美国德州仪器有限公司都已经发布了他们的 GPS 导航系统。尽管 GPS 目前还有些问题没解决好，如 EMS 与 GPS 的协同工作问题，但是电动汽车和燃油车都可以采用 GPS 导航技术。

7.8 再生制动系统

再生制动是电动汽车所独有的，在减速制动（刹车或者

下坡)时将车辆的部分动能转化为电能,转化的电能储存在储存装置中,如各种蓄电池、超级电容和超高速飞轮,最终增加电动汽车的行驶里程。如果储能器已经被完全充满,再生制动就不能实现,所需的制动力就只能由常规的液压制动系统来提供。现在几乎所有的电动汽车都安装了这再生一液压制动系统,从而可以实现节约制动能,回收部分制动动能,并为驾驶员提供常规制动性能。

一般而言,当电动汽车减速、在公路上放松加速踏板巡航或踩下制动踏板停车时,再生制动系统起动。正常减速时,再生制动的力矩通常保持在最大负荷状态;当电动汽车高速巡航时,其驱动电机一般是在恒功率状态下运行,驱动力矩与驱动电机的转速或者车辆速度成反比。因此,恒功率下驱动电机的转速越高,再生制动的能力就越低。另外,当踩下制动踏板时,驱动电机通常运行在低速状态。由于在低速时,电动汽车的动能不足以为驱动电机提供能量来产生最大的制动力矩,因而再生制动能力也就会随着车速的降低而减小。如图 1.8-153 所示,电动汽车的再生制动力矩通常不能像传统燃油车中的制动系统一样提供足够的制动减速度,所以,在电动汽车中,再生制动和液压制动系统通常共同存在。不过应该注意,只有当再生制动已经达到了最大制动能力,而且还不能满足制动要求时,液压制动才起作用。

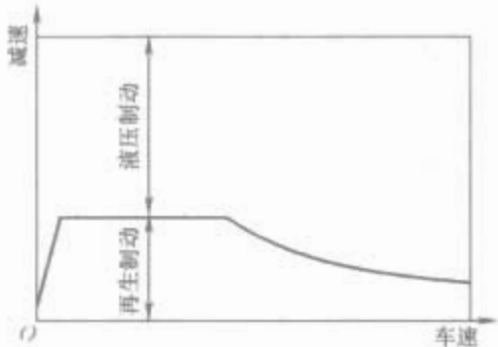


图 1.8-153 再生制动和液压制动

7.8.1 再生制动系统的结构

再生一液压混合制动系统是电动汽车所独有的,而燃油车没有,再生制动与液压制动之间的工作协调性是问题的关键所在,而且,应该考虑如下特殊要求:

为了使驾驶员在制动时有一种平顺感,液压制动力矩应该可以根据再生制动力矩的变化进行控制,最终使驾驶员获得所希望的总力矩。同时,液压制动的控制不应引起制动踏板的冲击,因而不会给驾驶员一种不正常的感觉。

由于在电动汽车上没有引擎驱动液压泵,所以需要有一个电动泵来提高液压。液压制动力矩是电控的,将产生的液压传到制动轮缸上,因而再生一液压制动系统需要防止制动失效的机构。为了提高系统的可靠性,满足安全标准,系统一般采用双管路制动,当其中一条管路失效时,另一条管路必须能提供足够的制动力。

为了使车辆能够稳定地制动,前后车轮上的制动力必须有很好的平衡分配。此外,为了防止汽车发生滑移,加在前后轮上的最大制动力应该低于允许的最大值(主要由滚动阻力系数决定)。

为了实现上述要求,再生一液压混合制动系统的结构设计如图 1.8-154 所示。驾驶员踩下制动踏板后,电动泵使制动液增压产生所需的制动力。制动控制与电机控制协同工作,确定电动汽车上的再生制动力矩和前后轮上的液压制动力。再生制动时,再生制动控制回收再生制动能量,并且反充到蓄电池中。电动汽车上的 ABS 及其控制阀的作用与传统燃油车上的相同,其作用是产生最大的制动力。

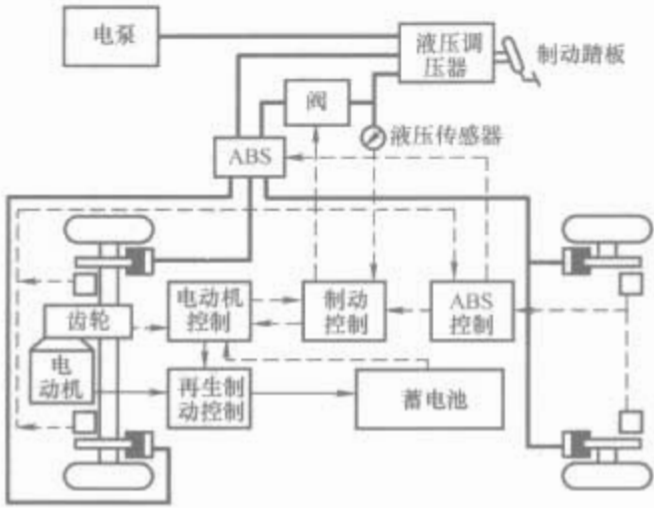


图 1.8-154 再生一液压制动系统的基本结构

7.8.2 制动控制

电动汽车上的总制动力矩是再生制动力矩与液压制动力矩之和,它们之间的分配比例关系如图 1.8-155 所示,目的是保持最大再生制动力矩的同时,为驾驶员提供与燃油车相同的制动感。当制动踏板力较小时,只有再生制动力矩施加在驱动轮上,并且与制动踏板力成正比。而非驱动轮上的制动力由液压制动提供,液压制动力也与制动踏板力成正比。当制动踏板力超过一定值时,最大再生制动力矩全部加在驱动轮上,同时液压制动力矩也作用在驱动轮上以获得所需的制动力矩。因而最大再生制动力矩可以保持不变,以便能够完全回收车辆的动能。

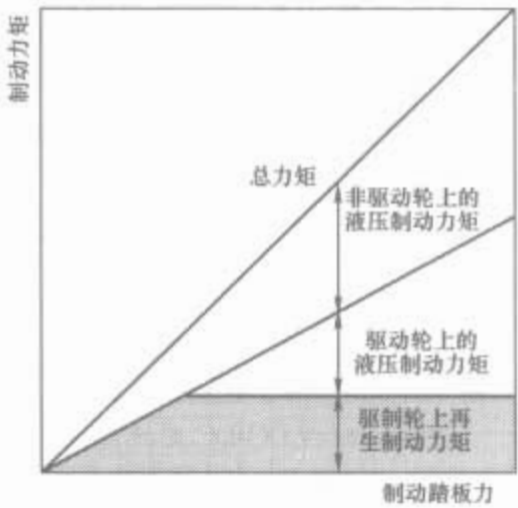


图 1.8-155 再生制动力矩与液压制动力矩的分配

在整个再生制动过程中,车辆的动能不可能完全转换为储能器的充电电能。再生制动所损失的能量包括空气阻力损失、滚动阻力损失、制动系统损失、电机损失、转换损失及充电损失等。尽管如此,现代电动汽车采用再生制动后能节省将近 20% 的能量。

参 考 文 献

- [1] 孙仁云,付百学. 21 世纪高等学校教材:普通高等教育“十一五”汽车类专业(方向)规划教材:汽车电器与电子技术. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 李文君,高树新,谢伯元,等. 汽车新型电气系统发展概述. 汽车电器,2005,(3):1-3.
- [3] 周震,杨正林. 时间触发 CAN-TTCAN. 汽车电器,2005,(5):3-7.
- [4] 周泉. 车载网络的发展动向(I). 汽车电器,2004,(1):56-59.
- [5] 周泉. 车载网络的发展动向(续完). 汽车电器,2004,(2):56-59.
- [6] 程明. “十一五”规划教材:微特电机及系统. 北京:中国电力出版社,2004.
- [7] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术. 北京:北京理工大学出版社,2000.
- [8] Antoni Szumanowski. 混合电动车辆基础. 陈清泉,孙逢春,译. 北京:北京理工大学出版社,2001.
- [9] 松本廉平. 汽车环保新技术. 曹秉刚,等,译. 西安:西安交通大学出版社,2005.
- [10] 陈全世,仇斌,谢起成,等. 燃料电池电动汽车. 北京:清华大学出版社,2005.
- [11] BOSCH 公司. BOSCH 汽车工程手册. 顾柏良,等,译. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [12] BOSCH 公司. 汽车电气与电子. 魏春源,等,译. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [13] 陈清泉,詹宜巨. 院士科普书系:21 世纪的绿色交通工具——电动车. 北京,广州:清华大学出版社,暨南大学出版社,2000.
- [14] 边焕鹤. 汽车电器与电子设备. 北京:人民交通出版社,1998.
- [15] 王启瑞. 汽车电气及电子设备. 合肥:安徽科学技术出版社,2000.
- [16] 汤姆·德恩顿. 汽车电气与电子系统. 鲁植雄,等,译. 2 版. 南京:江苏科学技术出版社,2005.
- [17] BOSCH 公司. 汽车电气与电子. 魏春源,等,译. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [18] B·霍莱姆比克. 汽车电气与电子系统. 徐鸣,余庆严,译. 北京:机械工业出版社,1998.
- [19] 王勇. 高等职业技术教育规划教材:汽车电气设备构造与维修. 北京:机械工业出版社,2002.
- [20] 赵仁杰. 交通中等专业学校统编教材:汽车电气设备(汽车运用工程专业用). 北京:人民交通出版社,1999.
- [21] 徐向阳. 高等工科教育汽车技术规划教材:汽车电器与电子控制技术. 北京:机械工业出版社,1999.
- [22] 赵福堂. 汽车电器与电子设备. 2 版. 北京:北京理工大学出版社,1997.
- [23] 朱红讯. 现代汽车电器电子设备修理全书. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1996.
- [24] 古永棋,赵明. 汽车电器及电子设备. 重庆:重庆大学出版社,1993.
- [25] 任凤文. 汽车电线束的设计(I). 汽车电器,2003,(4):1-4.
- [26] 任凤文. 汽车电线束的设计(II). 汽车电器,2003(5):19-25.
- [27] 鲁民巧. 全国高职高专教育十一五规划教材:汽车构造. 北京:机械工业出版社,2003.
- [28] 全国汽车维修专项技能认证技术支持中心编写组. 悬架和转向系统. 北京:教育科学出版社,2004.
- [29] 赵良红. 新世纪高等职业教育规划教材:汽车底盘电控技术. 北京:机械工业出版社,2002.
- [30] 刘越琪,张海峰. 新世纪高等职业教育规划教材:发动机电控技术. 北京:机械工业出版社,2002.
- [31] 吴荣辉. 电喷发动机控制系统. 福州:福建科技出版社,2002.
- [32] 张西振. 高职高专规划教材:汽车发动机电控技术. 北京:机械工业出版社,2005.
- [33] 黄林彬. 汽车维修高级培训教材:自动变速箱系统. 福州:福建科学技术出版社,2001.
- [34] 邓定瀛. 自动变速器原理与运用. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [35] 臧杰. 轿车新技术检修培训丛书:轿车自动变速器检修培训教程. 北京:机械工业出版社,2002.
- [36] 易建军. 现代汽车自动变速器. 成都:四川科学技术出版社,1998.
- [37] 麻友良. 电控自动变速器的结构与检修. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [38] 宋福昌. 电控液力自动变速器的结构与维修. 北京:国防工业出版社,2000.
- [39] 吴际璋,等. 当代汽车电控系统结构原理与维修(ECU ECT ABS ASR SRS CCS ASC 系统). 北京:人民交通出版社,2002.
- [40] 陈志恒,胡宁. 普通高等教育十五国家级规划教材:汽车电控技术(高职高专教育). 北京:高等教育出版社,2003.
- [41] 麻友良,丁卫东. 武汉科技大学. 普通高等教育交通类专业规划教材:汽车电器与电子控制系统. 2 版. 北京:机械工业出版社,2007.
- [42] 申荣卫. 高等职业技术教育试用教材:汽车电子技术. 北京:机械工业出版社,2003.
- [43] 简晓春,杜仕武. 高等学校教材:现代汽车技术及应用. 北京:人民交通出版社,2004.
- [44] 姚国平,舒华. 21 世纪汽车电工. 修订版. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [45] 毛峰. 高职高专规划教材:汽车车身电控技术. 北京:机械工业出版社,2004.
- [46] 秦明华. 汽车电器与电子技术(汽车运用工程专业用). 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [47] 曲金玉. 中国机械工业教育协会. 21 世纪高职高专系列教材:高职高专交通运输:汽车电器与电子设备,2001.
- [48] 舒华,姚国平. 普通高等教育十一五国家级规划教材:汽车电子控制技术. 2 版. 北京:人民交通出版社,2002.
- [49] 冯崇毅. 高等院校教材:汽车电子控制技术(上附光盘). 北京:机械工业出版社,2001.
- [50] 宋年秀,杜彦蕊. 汽车维修专项技能培训教材:汽车防抱死制动系统/安全气囊系统. 北京:人民交通出版社,2004.
- [51] 王秀贞. 汽车故障诊断与检修技术. 北京:人民邮电

- 出版社, 2003.
- [52] 魏朗, 王国. 现代汽车制动防抱死系统实用技术. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [53] 陆化普, 李瑞敏, 朱茵. 智能交通系统(ITS)系列丛书: 智能交通系统概论. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [54] 张其善, 吴今培, 杨东凯. 智能车辆定位导航系统及应用. 北京: 科学出版社, 2002.
- [55] 黄卫, 陈里得. 智能运输系统(ITS)概论. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [56] 常青, 杨东凯, 寇艳红, 等. 车辆导航定位方法及应用. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [57] 富立, 范耀祖. 智能交通系统(ITS)系列丛书: 车辆定位导航系统. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [58] 王笑京, 齐彤岩, 蔡华. 智能交通系统(ITS)系列丛书: 智能交通系统体系框架原理与应用. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [59] 杨琪, 王笑京, 齐彤岩, 等. 智能交通系统(ITS)系列丛书: 智能交通系统标准体系原理与方法. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [60] 本书专题组. 交通科技丛书: 中国智能交通系统体系框架. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [61] 吴兵, 李晔. 高等学校试用教材: 交通管理与控制. 3版. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [62] 杨兆升. 高等学校试用教材: 智能运输系统概念. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [63] 李卫平. 智能交通技术应用. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [64] 张国伍, 彭宏勤. 智能交通系统工程导论. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [65] 周建郑. 全国水利水电类高职高专统编教材: GPS定位原理与技术. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [66] 李明峰, 冯宝红, 刘三枝. 21世纪高等学校规划教材: GPS定位技术及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [67] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [68] 万钢. 中国“十五”电动汽车重大科技专项进展综述. 中国科技产业, 2006, 2: 110-117.
- [69] 孙逢春. 电动汽车发展现状及趋势: 科学中国人, 2006(8): 44-47.
- [70] 陈清泉, 孙立清. 电动汽车的现状和发展趋势: 科技导报(北京), 2005, 23(4): 24-28.
- [71] 崔心存. 现代汽车新技术. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [72] 安东尼·索左曼罗夫斯基. 混合电动车辆基础. 陈清泉, 孙逢春, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
- [73] 陈全世, 仇斌, 谢起成, 等. 燃料电池电动汽车. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [74] 德国 BOSCH 公司. BOSCH 汽车工程手册. 中文 2 版. 顾柏良, 等, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [75] 郭炳焜, 等. 锂离子电池: 中南大学出版社(中南工业大学), 2002.
- [76] 胡骅, 宋慧. 电动汽车技术: 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [77] 万沛霖. 电动汽车关键技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [78] 张万奎. 汽车蓄电池. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [79] 裘玉平. 汽车驾驶、汽车维修、汽车维修与驾驶专业用, 全国交通中等职业技术学校通用: 汽车电气设备. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [80] 曹利民. 汽车维修专项技能培训教材: 轿车音响原理与检修. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [81] 孙余凯, 等. 新型汽车电子电器原理与故障检修方法. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [82] 李春明. 银领工程高等职业教育技能型紧缺人才培养培训工程系列教材: 汽车电器设备与维修. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [83] 崔选盟. 中等职业教育国家规划教材配套教材, 汽车车身电气设备维修专门化: 汽车运用与维修专业. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [84] 李春明. 高等职业教育汽车运用与维修专业教材: 汽车车身电子技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [85] 齐峰. 教育部职业教育与成人教育司推荐教材, 中等职业学校汽车运用与维修专业教学用书: 汽车电工. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [86] 周建平. 高等职业教育汽车运用技术专业规划教材: 汽车电气设备构造与维修. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [87] 邵恩坡, 等. 汽车使用与维修系列书: 汽车电气与电子设备的使用与维修. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [88] 丁·厄尔贾维克. 当代汽车修理技师丛书: 汽车电气与电子系统. 徐鸣, 俞庆严, 译. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [89] 胡式旺, 黎小明. 新世纪高等职业教育规划教材: 汽车电器电子设备原理与检修. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [90] 李朝晖. 汽车保养与维修丛书: 汽车电器及电子设备. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
- [91] 张春化, 蹇小平. 汽车电器与电路. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [92] 李炎亮, 高秀华, 成凯. 汽车电子技术. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [93] 张为春, 中国机械工业教材协会. 21世纪高职高专系列教材: 汽车构造. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [94] 陈有方. 汽车保养与维修丛书: 汽车原理及构造, 上册. 重庆: 重庆大学出版社, 2006.
- [95] 陈有方. 汽车保养与维修丛书: 汽车原理及构造, 下册. 重庆: 重庆大学出版社, 2006.
- [96] 汪立亮. 现代汽车维修技术系列丛书: 现代汽车电器设备原理与检修. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [97] 武万龙. 现代汽车仪表及电路检修. 成都: 四川科学技术出版社, 2001.
- [98] 郝传宾. 汽车维修专项技能培训教材: 汽车音响. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [99] 王遂双. 现代汽车电器与电子设备. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [100] 陈渝光. 高等工科学学校教材: 汽车电器与电子设备. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [101] 乔维高主编. 现代汽车电器与电子设备: 结构·使用·维修. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1996.

第2篇 轨道交通电气

主编单位：株洲南车时代电气股份有限公司

南车株洲电力机车有限公司

北京全路通信信号研究设计院

主 编：刘友梅 冯江华

编写人员：冯江华 李春阳 严云升 陈 浩 王卫安 严树刚

杨期翔 张明武 王益民 忻 力 刘可安 胡家喜

荣智林 杨文昭 陈燕平 李江红 姚中红 尚 敬

许峻峰 郭平华 贺德强 柯以诺 郭淑英 肖 波

李益丰 吴 强 李 蔚 谭寿云 曹怀志 唐海燕

谢湘剑 王 伟 李 云 周卫成 石晓靖 梁彦锋

刘连根 唐 斌 单 晟 王正星 姚永康 言 武

谭雪谦 (株洲南车时代电气股份有限公司)

刘友梅 杨 颖 朱 进 许晓勤 王泰杰 陈明国

李 涛 林 平 许群芳 刘豫湘

(南车株洲电力机车有限公司)

申大川 马丽兰 王正瑛 谢衡元 姜永梅 葛淑云

石 波 陈 梅 曹广金 张玉凤 袁 松 赵自信

秦兆爽 赵 星 李 克 孙吉良 李志兵 丁 昆

耿 颖 (北京全路通信信号研究设计院)

张 良 (北京市地铁运营有限公司)

于松伟 韩连祥 杨兴山

(北京城建设计研究总院有限责任公司)

张世平 (北京和利时系统工程股份有限公司)

邱宽民 (北京交通大学)

郜春海 马琳 (北京交通大学电子信息工程学院)

李中浩 朱涛 (铁道部信息技术中心)

汪秋宾 (铁道第二勘测设计院)

刘莉蓉 袁勇 (铁道第二勘察设计院)

梁东升 (广州市地下铁道设计研究院)

张海洋 骆长清 张兴华

(黑龙江省双鸭山矿业集团公司)

章程远 (湖南湘依公司)

何丹炉 (南车四方机车车辆股份有限公司)

连级三 胡基士 蒋启龙 郭育华 邓午天 丁娜

(西南交通大学磁浮列车与技术研究所)

王黎 (西南交通大学理学院)

王长林 (西南交通大学信息科学与技术学院)

魏衍成 (株洲九方电器设备有限公司)

张毅 王加森 (淄博牵引电机集团有限公司)



第1章 总 论

1 轨道交通的基本概念

1.1 基本定义

1.1.1 轨道交通的定义

世界上公认的公共交通运输方式有5种：轨道运输、公路运输、水路运输、航空运输、管道运输，它们共同构建起了当代综合交通运输体系。所谓“轨道交通”，就是以轨道作为承载支承和导向约束的一种交通运输方式，一般人们俗称为“铁路”。目前，世界上绝大多数的轨道交通都是采用2根钢轨，极少数特殊场合也有采用一个单独的轨道梁（如我国重庆市的独轨交通）。磁浮交通车辆静止时支承在轨道梁上，运行时则依靠磁力作用悬浮在轨道梁上，但仍以轨道梁作为运行的导向约束，因此也可视为轨道交通的一种特殊形式。

磁浮交通尚未完全商业化，上海30km长的磁浮线是世界范围内唯一商业载客运营的示范线。图2.1-1～图2.1-3是双轨、单轨、磁浮的示意图。

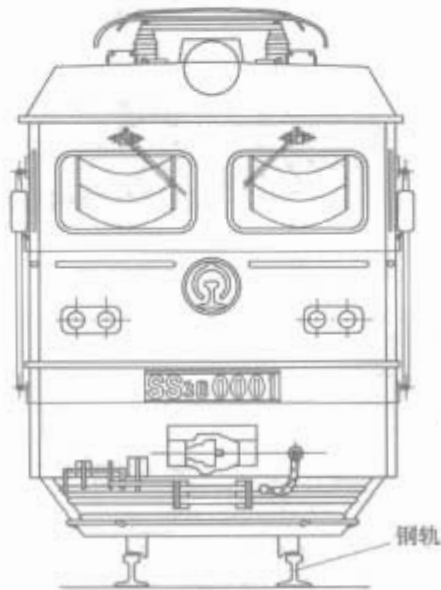


图 2.1-1 双轨示意图

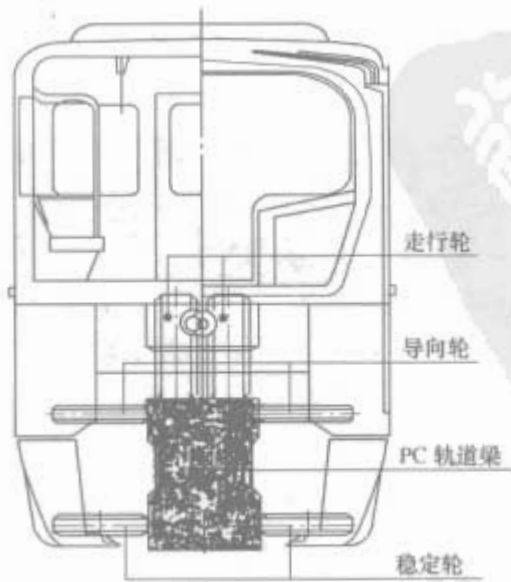


图 2.1-2 单轨示意图

对于双轨系统而言，2根钢轨头部内侧间的距离称之为“轨距”，见图2.1-4中的S。由于历史遗留的因素，世界各

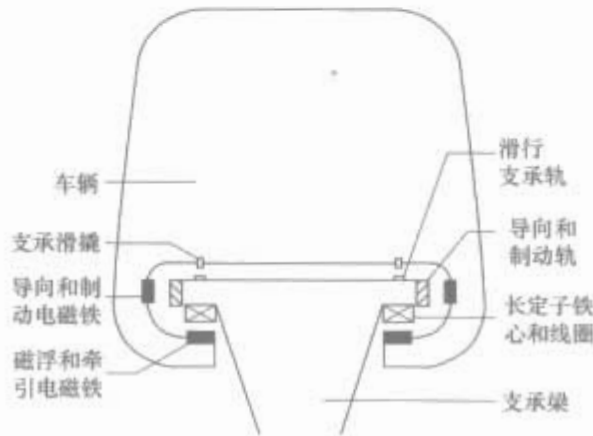


图 2.1-3 磁浮示意图

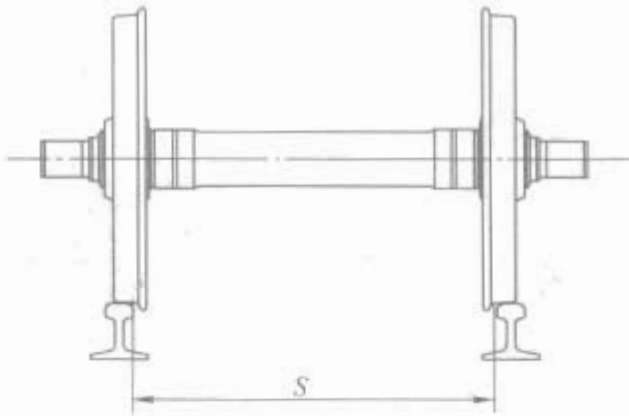


图 2.1-4 轨距示意图

地存在着多种不同的轨距制式，可简单地划分为宽轨、标准轨和窄轨三大类。标准轨系统轨距为1435mm，占总里程的65%以上，主要在欧洲、中国、美国、日本等国家和地区采用；宽轨系统轨距大于1435mm，主要有1520mm和1668mm两种，前者主要集中在俄罗斯及中亚国家，后者主要在西班牙等国家；窄轨系统轨距小于1435mm，主要有1000mm（也简称“米轨”）和1067mm两种。轨距制式的不同制约了不同系统之间的连通，给运输组织带来了极大的困难。解决办法是采用可变轨距车辆。目前，新建轨道交通线路绝大多数都是标准轨距。

1.1.2 轨道交通发展

自从1825年英国修建了世界上第一条铁路——斯托克顿至达林顿铁路以来，轨道交通的发展已历时180多年，它是现代各种交通运输方式中资格最老的成员。它的出现是第一次产业革命的产物，适应了大规模生产对物流的巨大需求，充分体现出轨道交通运力巨大、成本低廉的优势，因而迅速得到了极大地普及和发展。到19世纪末，全世界通车里程已经达到65万km，2005年末全世界通车里程约140万km。

中国第一条铁路——吴淞铁路是1876年建成的，然而这条铁路仅经营了一年多时间，就被清政府赎回拆除了。5年后，1881年建成了唐山至胥各庄铁路，从而真正揭开了中国铁路发展的序幕。新中国成立以来，中国铁路得到了长足的发展，铁路运营总里程从2.1万km发展到2005年底的7.5万km，并新增了2万多km的电气化线路。铁路在综合交通体系中承担起了全国一半以上的货运周转总量和1/3以上的客运周转总量，铁路运输密度和客运周转量一直

雄居世界第一。尽管如此，中国铁路发展的步伐仍跟不上国民经济的迅猛发展。为此，根据《中长期铁路网规划》，未来 15 年我国还将兴建 2 万多 km 的高速和客运专线，铁路的发展前景十分看好。

1.2 轨道交通的分类

1.2.1 干线及城际轨道交通

干线及城际轨道交通俗称“大铁路”，是指用于运输货物及城际间客运交通的轨道交通方式。铁路具有运力大、耗能少、成本低、正点率高、全天候等特点。

铁路上运行的列车按客运列车和货运列车划分，客运列车又划分为机车牵引客车组和自带动力固定编组的动车组两种；货运列车则都是采用机车牵引货物车辆编组方式。因此，铁路上运行的机车车辆主要由牵引机车、动车组、客车、货车等组成。图 2.1-5～图 2.1-8 分别是牵引机车、自带动力的动车组、客车、货车的示意图。



图 2.1-5 牵引机车示意图

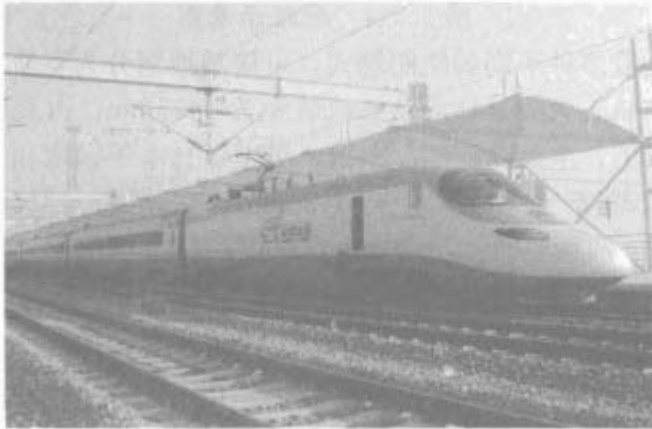


图 2.1-6 自带动力的动车组示意图



图 2.1-7 客车示意图

1.2.2 城市轨道交通

在大、中型城市公共交通中，还存在大量承担居民日常出行运载任务的轨道交通，例如北京、上海、广州、深圳等城市的轨道交通。城市轨道交通又按照运载能力的大小分为地铁和轻轨两大类。国际上通行的识别法是：把每小时单向载客量大于 3 万人次的轨道交通称之为“地铁”，而把小运



图 2.1-8 货车示意图

量的轨道交通笼统称为“轻轨”。由于地下工程建设投资十分庞大，只有设计的载客量很高时经济上才可行，因此地下运营的轨道交通一般都可被视为“地铁”，然而地铁本身并不仅仅局限于地下运行，许多城市的地铁往往还延伸运营到地面甚至高架，构成一个大运量的轨道交通网络。地铁的种类并不太多，一般都是采用大铁路标准轨距的多编组列车；轻轨的种类则十分繁多，如有轨电车、单轨车、吊挂车等。图 2.1-9～图 2.1-11 分别是地铁列车、有轨电车、吊挂车的示意图。



图 2.1-9 地铁列车示意图



图 2.1-10 有轨电车示意图

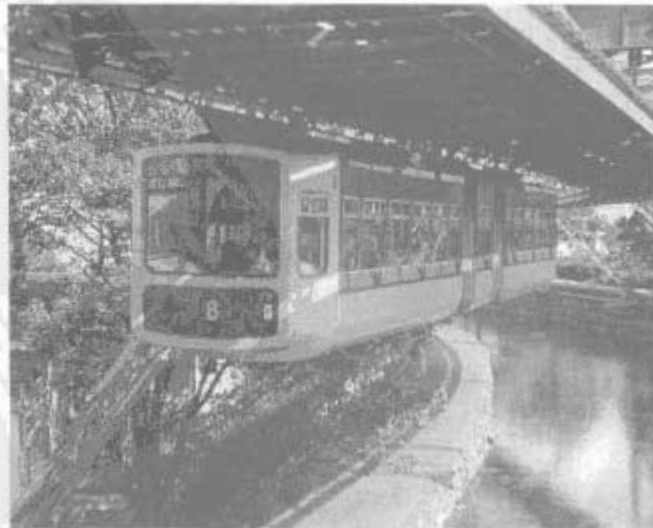


图 2.1-11 吊挂车示意图

1.2.3 磁浮交通

磁浮是一种新型的轨道交通方式，轨道虽仍作为运行支撑，但不是直接的接触支撑，而是通过电磁吸引或排斥产生升力悬浮起的间接支撑，所以驱动也不是轮轨的黏着模式，而是采用非黏着模式的直线电动机驱动。由于运行时车辆与轨道梁之间不接触，不再存在机械摩擦的阻力，因此磁浮交通的显著特点是运行时速高，最高可达每小时500km，上海磁浮线最高运营时速是430km。图2.1-12所示为上海磁浮车辆。



图 2.1-12 上海磁浮车辆

1.3 轨道交通的特点

1.3.1 导向约束

与汽车等其他陆上交通方式不同，轨道交通的最显著的特点就是有轨道约束。正是由于有轨道的导向约束，再加上单向顺序行驶及信号行车调度，才使轨道交通具有其他各种交通方式无可比拟的优势，如不易撞车、安全性好等。汽车等陆上交通工具由于驾驶随意性太大，由此导致的交通事故发生率很高，我国每年道路交通事故发生几十万起，死亡人数超过十万人。因此，轨道交通运载方式的安全性远远优于其他陆上交通方式。图2.1-13是钢轨对车辆的导向约束示意图。

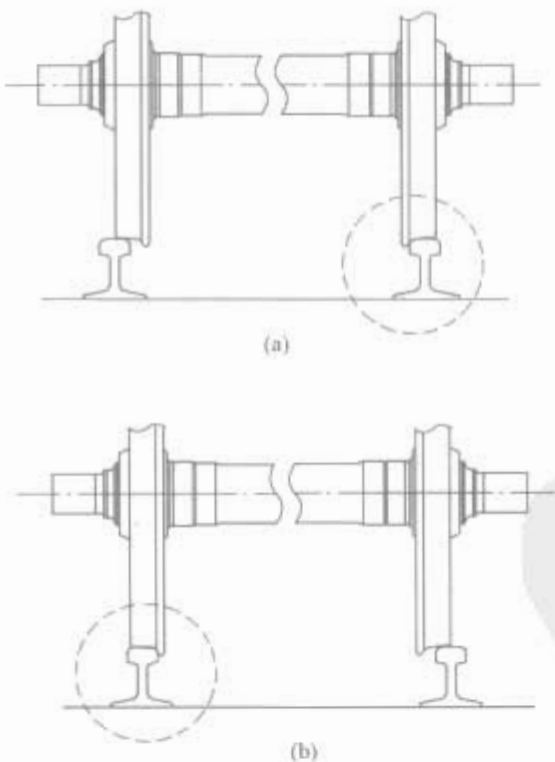


图 2.1-13 钢轨对车辆的导向约束示意图
(a) 右轨挤压；(b) 左轨挤压

1.3.2 轮轨接触

轨道交通（除磁浮以外）的另一个显著特点是车辆轮对与钢轨的接触，这一方面起到了支撑作用，另一方面对黏着牵引模式而言，轮轨的相互作用还产生了牵引力。钢轨能够承载的单个轮对的轴重与路基的状况、钢轨本身的材质及规格有关，我国铁路能够承载25t轴重的车辆，美国铁路能够

承载33t轴重的车辆，城市轨道交通车辆的轴重一般都小于14t。轨道承载的轴重与线路的运输能力密切相关，轴重越大运能也就越高。

1.3.3 高效节能

轨道交通方式的又一个显著的特点是高效节能，这是由于轮对与钢轨之间滚动摩擦力很小，一般阻力仅有千分之几，运行时需要消耗的功率很小。再加上轨道上运行的列车不像汽车那样需要频繁刹车、加速，这样消耗的能量就更少。特别是电力牵引的轨道交通，能够有效地利用各种能源高效转化而来的二次能源——电力，并由于可实现再生制动能量向电网的回馈，就更具有显著的节能效果。一般情况下，轨道交通的能耗仅为汽车的1/3、飞机的1/10，甚至更低。随着石油价格的日益高涨，这种耗能的差距还将继续拉大。图2.1-14是铁路与汽车、飞机的耗能对比示意图。

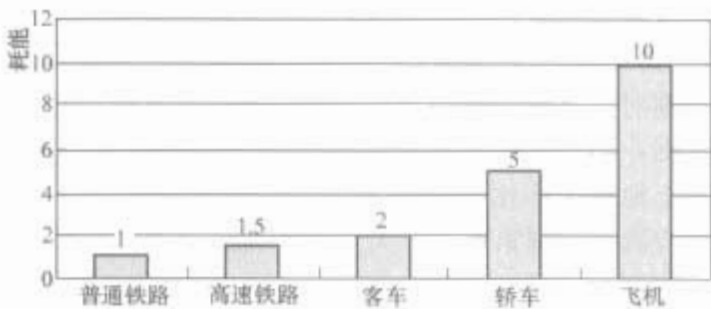


图 2.1-14 铁路与汽车、飞机的耗能对比示意图

1.3.4 安全环保

轨道交通的安全性十分高，远远高于汽车、轮船等其他交通方式。高速铁路由于采取了更为严格的安全保护和监控措施，其安全性也大大超过飞机。例如日本新干线、法国TGV高速铁路开通运营数十年来，每年运送旅客上十亿人次，仍保持了零伤亡的纪录。从安全排序上看，汽车安全性最差，其次是普通铁路、飞机，而高速铁路安全性最好。

此外，由于铁路运输主要为高效、低排放的内燃机车和近乎零排放的电力机车，因此其环保性远远优于汽车、飞机、轮船等交通工具，铁路运输与汽车、飞机污染气体排放量对比见表2.1-1，NO_x气体排放对比见图2.1-15。

表 2.1-1 铁路运输与汽车、飞机污染气体排放量对比

排放气体	g/m ³		
	汽车	飞机	铁路
CO	1.26	0.51	0.003
NO _x	0.25	0.70	0.10
HC	0.10	0.24	0.01
CO ₂	111	148	28
SO ₂	0.03	0.05	0.10

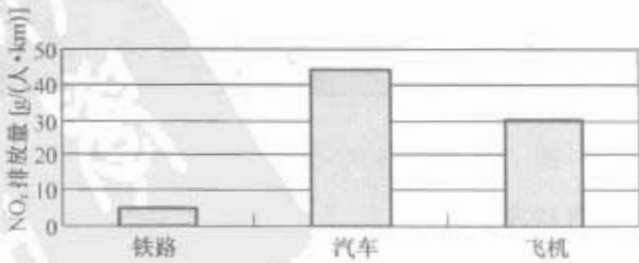


图 2.1-15 铁路与汽车、飞机的 NO_x 气体排放对比示意图

1.3.5 全天候正点

由于轨道交通是在有轨道约束下的线路上运行，并且是受信号引导，在各种恶劣的气候条件下（如大雾、雨雪等），

只要确保轨道、道岔、信号和供电的正常就可以运营。而高速公路和机场对大雾有着严格限制，当能见度低到一定程度就必须全部关闭，而铁路列车即使是在大雾情况下仍可正常运行。因此，铁路交通受气候的影响最小，运行正点率高。

1.3.6 运能大

轨道交通每列货运列车载重可达5000多t，单元组合重载列车载重可达20000t以上；每列客运列车载客定员高达1000多人；列车的行车间隔最短仅有数分钟。相比之下，一辆公共汽车载客一般不足50人，一辆载货汽车装载能力仅为数十吨，但行车密度较高，行车距一般仅有十几秒；一架飞机载客一般只有几百人，一架货机装载也仅上百吨，飞行间隔一般数分钟。由此看出：轨道交通的运能大大超过汽车，飞机的运能、运效更无法比拟。轨道交通更适合承担如煤炭、矿石、钢铁、粮食等关系到国计民生的大宗货物运输，以及城市和城际间人们日常出行所需的繁忙旅客运输。

1.3.7 占地省

根据对大量既有铁路与汽车的运能的比较和二者占地的比较数据，同样运能的高速铁路相当于一条6车道高速公路，其土地利用率比公路高40%。对于我国这样一个土地资源比较匮乏的国家而言，大力发展轨道交通是节约土地资源的一个有效途径。

2 轨道交通的技术发展

2.1 牵引动力的发展

一提起铁路，人们很自然就会联想到火车头。然而，“火车头”称谓在现代只能看作是机车的一种民间通俗叫法。在内燃机车、电力机车出现之前，蒸汽机车一统天下时，蒸汽机车以煤为燃料，炉膛里大火熊熊，所以称之为火车头既形象又贴切，见图2.1-16。蒸汽机车，顾名思义以蒸汽为动力。第一次工业革命诞生了瓦特蒸汽机，人类社会进入了蒸汽机时代，1825年在英国诞生了第一条铁路，工程师史蒂芬森巧妙地运用了英国人瓦特发明的蒸汽机技术，以蒸汽的热能转换为机械能，通过连杆推动车轮运转。蒸汽机车因构造简单、造价低廉、快速实用、安全可靠，迅速在英国、欧洲和北美得到广泛使用，开始了持续100多年独霸铁路牵引动力垄断地位的时代。随后才逐渐出现电力机车、内燃机车、燃气轮机车。



图 2.1-16 传统的蒸汽机车外形图

2.1.1 蒸汽机车的发展

1803年英国的特里维西克制造出第一台可在轨道上行驶的蒸汽机车；1814年，英国的斯蒂芬森制造出一台5t重的“皮靴”号蒸汽机车，这通常被认为世界上第一台成功的机车。但真正在铁路上使用，并为现代蒸汽机车奠定基础的，是斯蒂芬森父子设计建造的，并于1829年在比赛中获奖的“火箭”号蒸汽机车，它行驶速度达58km/h，创造了

当时地面行驶车辆的最高速度。进入20世纪，采用过热蒸汽的蒸汽机车迅速推广，这时的机车向大蒸发量、大尺寸、大锅炉的大型化发展。中国于1881年制造出自己的第一台蒸汽机车“中国火箭”号，运行于唐山—胥各庄铁路。蒸汽机车虽经100多年的发展，但因其运用热效率只有6%~8%，加上保养维修量大、污染严重、日运行里程短，因此逐渐被热效率高、运用率高的内燃机车和电力机车取代。美国于1960年、英国于1968年、法国于1972年、日本于1975年、德国和前苏联于1977年相继停止使用蒸汽机车，我国也于2005年底停止使用蒸汽机车。

2.1.2 内燃机车的发展

1894年，内燃机被发明并应用到汽车上，人类社会进入以石油燃料为能源的内燃机时代。19世纪末采用柴油机作为动力的内燃机车逐渐出现，见图2.1-17，并开始逐步替代陈旧落后的蒸汽机车，使机车功率、运行速度得到较大提升。由于柴油机的外特性不适应牵引列车的要求，因此不能用它直接驱动机车，必须在柴油机与机车动轴之间加装一套传动装置，以实现机车理想的牵引性能。按照传动方式不同，可分为电传动和液力传动。铁路上运营的内燃机车绝大多数是电传动车，它的工作原理是柴油机直接带动一台发电机，发电机输出电能驱动动轴上的电动机，再通过机械传动装置（齿轮）将动力传送到轮对上，驱动机车前进。



图 2.1-17 传统的内燃机车外形图

1913年，瑞典制造出电力传动内燃机车；1924年，苏联用一台735kW潜水艇柴油机制成一辆电力传动内燃机车；1923年，美国制成220kW的电力传动内燃机车。到了20世纪30年代初，内燃机车进入了试用和实用阶段，功率多在1000kW以内，主要以站场调车机车为主。到30年代后期，出现了多节机车联挂的干线客运内燃机车；其后通过在内燃机上配装废气涡轮增压系统，机车功率更加提高。内燃机车的经济效益比蒸汽机车高得多，功率也比蒸汽机车大得多，这是内燃机车逐渐替代蒸汽机车的最主要原因。

2.1.3 电力机车的发展

电的发明促成了1882年世界上第一座商用电厂的诞生，电能开始被人们开发利用。电能的广泛应用促成了20世纪社会变革、工业化进程和城市现代化，人类社会进入电气化时代。20世纪初，随着供电技术的逐渐普及，采用外部供电驱动的电力机车（见图2.1-18）逐渐走上历史舞台。它甩掉了庞大的柴油机，提供了更为强大的动力，也大大降低了机车的质量。电力机车，顾名思义依靠电力来驱动，它直接从电网获取能量，经车载变压及变流装置的变换后驱动电动机，再通过机械传动装置将动力传递到动轮对上。

1835年，荷兰的斯特拉廷和贝克尔试制了以电池供电的二轴小型铁路电力机车；1842年，苏格兰的戴维森制造出一台由40组电池供电的标准轨距的电力机车；1879年，德国的西门子公司设计制造了一辆小型电力机车，电源由机车外部的150V直流发电机供给，并通过两轨道和其中间的



图 2.1-18 传统的电力机车外形图

第三轨道向机车输电，这被认为是世界上第一台成功运用的电力机车；1890 年，英国伦敦首次用电力机车在 5.6km 长的一段地下铁道上牵引车辆；1895 年，美国的巴尔的摩铁路隧道区段采用了干线电力机车，功率达到 1070kW。20 世纪初，欧洲有几个国家曾建成几段以三相交流电供电的电气化铁路。从 20 世纪初开始，电力牵引的优越性已被公认，到 20 年代末，几乎每个欧洲国家都已有电气化铁路。因三相交流供电系统和机车变流装置复杂，电力机车逐渐趋向采用工频单相交流供电方式。50 年代以后，随着大功率汞弧整流器和引燃管整流器的出现，特别是硅二极管整流器的出现，促进了采用工频交流电的电力机车的发展。中国于 1958 年制成了第一台以引燃管整流的“韶山”型电力机车，1968 年又改用硅整流器成功，批量定型成为“韶山-1”型电力机车。由于没有柴油机功率的限制，许多电力机车的轴功率已经达到了原来内燃机车的 3 倍以上，这标志着铁路牵引动力发展到了一个新高潮。20 世纪 60 年代以来，随着电力牵引的不断普及，重载货运、高速客运及城际交通逐渐兴起，世界铁路呈现出勃勃生机。

2.2 牵引方式的发展

随着铁路的不断发展，牵引方式也在不断地发展。在货运领域，货运列车都是采用机车牵引货车方式，即动力集中在列车的头部；重载列车一般采用单元组合方式，即由几台机车重联构成组合动力再牵引货物列车构成单元列车；更大的重载列车，还可以由上述的单元列车连接成单元组合列车，以提高运能。在客运领域，有两种不同的制式。以欧洲为代表的国家一直到 20 世纪 90 年代仍主要采用以机车牵引客车的动力集中方式，即使是在固定编组的电动车组和高速列车上，也较多采用两端带动力车的动力集中配置方式。而日本由于城市轨道交通的兴起要早于大铁路的兴起，在城市轨道交通中传统采用动力牵引分散方式，即列车的动力分散在载客的车辆上，没有一个单独的动力头。日本干线铁路客运也全部延伸采用传统的动力分散牵引方式。

一般而言，机车牵引客车方式编组灵活、解编方便、维护保养简单，适应于长距离和中低速（<200km/h）客运的需求，例如从长距离运营中需要更换机车和增减客车都很快实现。固定编组的动车组存在两种不同的动力配置方式：一种是两端带动力车的动力集中方式；另一种是动力分布在全列各客车上的动力分散方式，二者各有其优缺点。动力集中方式成本低、维护保养简便、编组灵活，适应于客运中高速（<300km/h）的需要，缺点是动力车单轴功率大、黏着利用控制难度大、黏着利用要求高、功率冗余度低、动力车轴重大、轮轨作用大；动力分散方式功率冗余度高、单轴功率小、黏着利用控制简单、黏着利用要求低、加减速快、轴重轻、轮轨作用小、运营可靠性高，对客运的高速（>300

km/h）的运营优势特别突出，其缺点是维护保养复杂、成本高、客室噪声和电磁防治要求高。选择何种牵引方式应根据不同运营的需求仔细评估，各种牵引方式的特点对比见表 2.1-2。

表 2.1-2 各种牵引方式的特点对比

项 目	机车牵引客车	动力集中动车组	动力分散动车组
成 本	低	中	高
运营灵活性	高	中	低
功率冗余度	低	中	高
黏着利用要求	高	中	低
运营可维护性	高	中	低
运营可用性	低	中	高

各种不同客运牵引方式的动力配置示意图，见图 2.1-19～图 2.1-21。



图 2.1-19 机车牵引客车示意图



图 2.1-20 动力集中动车组示意图



图 2.1-21 动力分散动车组示意图

2.3 牵引供电方式的发展

最早的电气化铁路供电是直流制，最初只能供 600V 的直流，供短距离线路使用。后来为适应大功率机车和较长距离的电气化铁路需要，直流供电电压逐步提高到 1500V，最高达到 3000V。世界范围内直流电气化铁路因历史悠久，已有约 100000km，约为电气化铁路总里程的一半。

为了进一步提高供电电压以提高供电经济性，解决高压直流电动机的问题，人们开始尝试试验交流高压供电，在机车上装有变压器并使用单相交流串励换向器电动机，但由于单相换向器电动机换向条件差，因此采用降低电源频率的方法以达到改善换向。这样在德国、瑞典、瑞士、挪威、奥地利等国就出现了一种新的供电制式，即交流电压 15kV、频

率 $16\frac{2}{3}$ Hz。也有少数用 11kV、25Hz。各国运行总计里程近 3 万 km。现在除已经使用这种电流制的国家外，已难扩展。

第二次世界大战以后，随着工业化发展，工业电网也迅速发展，将铁路电力牵引输电与工业电网联网，可获得非常高的效益。1951 年法国首创采用单相工频交流制 25kV、50Hz 的供电制式，并在 1954 年后获得推广普及，逐渐显示出其与工业电网兼容性好、供电特性好等优势。除已形成直流系统和单相低频交流系统的铁路扩建外，新建干线铁路已全部采用单相工频交流制，但市郊铁路、城市交通、地下铁道、工矿企业内部运输等供电距离短的地方，一般仍采用直流供电。

我国干线铁路电气化由于发展比较晚，1961 年第一条电气化铁路才通车，因此一开始就采用了先进的单相工频交流制，标称电压为 25kV，频率为 50Hz。目前，中国电气化铁路全部采用单相工频交流制。在国内城市轨道交通领域，我国都采用直流供电方式，主要有 750V、1500V 两种方式。从经济的角度看，选用高等级的供电电压可以增加牵引供电的距离，减少牵引变电所的数量，压缩变电所建筑面积，减少传输导线的有色金属用量，降低传输电能损耗，节约投资和运行费用；同时还可以提高牵引供电电压的品质，减少杂散电流。但相应也提高了牵引变电所和机车车辆电器、电机设备的绝缘电压等级，增加了电气设备的投资。

IEC 推荐的牵引系统供电电压见表 2.1-3。

表 2.1-3 牵引系统供电电压

供电类型	电压标称值 (V)	交流系统额定频率 (Hz)
直流供电	600 ^①	
	750	
	1500	
	3000	
单相交流供电	6250 ^①	50 或 60
	15 000	$16\frac{2}{3}$
	25 000	50 或 60
	50 000	50 或 60

① 有限制使用的条件，参见 IEC 850 (1988)。

2.4 通信信号与信息化的发展

1825 年英国在世界上第一条铁路上，首次采用了人工执旗引导的方式确保列车运行的安全，这就是通信信号的最早雏形。1839 年发明的指针式电报机开始用于铁路行车调度，真正实现了站间闭塞，开创了采用通信技术保证铁路运输及其安全的先河。20 世纪后期无线通信、光纤传导及计算机技术的迅猛发展，又使通信技术迈入了新的台阶。经过近 200 年的发展，主要通信模式经历了由模拟到数字、从有线到无线、电传输到光传输的发展过程，通信技术产生了巨大的飞跃。轨道交通信息依靠通信传送，通信与信息密不可分，通信与信息技术的融合 (ICT) 已成为通信技术发展的主旋律。随着世界铁路网的不断发展，通信系统正在由点对点、点对多点的局部通信演变为覆盖整个路网的通信网络。

我国干线铁路通信的发展一直以通信技术的发展为基础，以铁路的发展为动力。1957 年我国宝成铁路宝鸡—凤州第一条电气化铁路中，国内铁路通信行业组织攻关自主研发了第一条用于长途通信及区段通信的电气化电缆，开通了 12 路载波调度及专用通信系统，满足了电气化铁路的通信

系统需求。随着行业的发展，载波通信也由 12 路发展为 300、960 路载波及满足铁路区段通信的漏泄载波，在话音通信中大量使用了加拨引示号的长途自动接续机，满足了铁路运输指挥和行业管理的地区通信及长途通信需求。大秦线是全路第一条采用光缆数字通信系统的线路，也是我国首次将光纤用于长途通信的线路。同时，干线铁路通信网是国家三大通信网络之一，在紧急时刻可发挥关键的作用。

世界上第一条城市轨道交通（城轨）线路是 1863 年建成的英国伦敦地铁，该线路配置了通信联络系统。我国第一条地铁为北京地铁一期工程，于 1969 年投入运营。建立了电缆通信系统，开通了纵横式交换机、音频选叫调度电话、车站广播、时钟系统等。1983 年北京地铁通信改造引进了光缆及数字通信系统，例如程控交换机、光传输设备、无线通信系统。随着上海、广州地铁的开通，近年我国进入了城市轨道交通的快速发展期，城轨通信也进入了新的发展阶段，传统的传输、公务电话、广播、时钟、闭路电视、旅客服务全部实现了数字化，配置了支持自动售检票、防灾报警、环境设备监控的安全可靠的数字通信网络，当前采用光缆和无线局域网技术的列车控制系统也已投入建设，通信已经成为城轨信息化的重要基础设施。

铁路通信网络基础平台为通信的各应用网络及信息化的各应用系统提供了公共的基础网络环境，满足了各运营管理部门语音、数据、图像的业务传送需求，满足了各应用系统互连互通和社会化服务的需求。它由光传送网、移动通信网、数据通信网、电话网、会议电话电视网及辅助的支撑网络组成。

3 轨道交通系统的组成

3.1 运输装备

3.1.1 黏着牵引的动力模式

3.1.1.1 黏着牵引概念

机车或动车的牵引电动机将电能转变为机械能，通过齿轮传递给动轮，这是产生牵引力的必要条件之一。另一必要条件是动轮与钢轨之间的黏着作用。机车和动车牵引电动机产生的力矩是内力，不能使机车产生平移运动，若要使机车产生移动，必须有机车以外的外力。钢轨在垂向给动轮以必要的支承，并且在水平方向承受动轮作用于钢轨的力，而对动轮产生反作用力，这是一个外力，可以使机车产生平移运动。将这种动轮与钢轨的相互作用称为黏着牵引力。

黏着是指 2 个具有一定表面粗糙度的物体，在一定压力下相互接触，像齿轮那样处于啮合并传递作用力的一种物理状态或物理现象。黏着状态下所传递的作用力，称为黏着力。大量的分析和实验结果表明，作用在机车上的使其前进的牵引力，只有在机车车轮和铁路钢轨的接触面上具有一定的摩擦，而出现一定的车轮相对轨道的切向运动时，才能切实地发挥其牵引作用。

机车的轮周牵引力依赖于轮轨的黏着。在轮荷重力 P 的作用（见图 2.1-22）下，轮轨接触部分发生弹性变形，形成椭圆形接触区。当车轮在驱动力矩 M 的作用下向前滚动时，轮轨材料在接触区附近发生弹性变形，从而在接触面上产生切向力 F ，且 $F=M/R$ (R 为车轮半径)。切向力 F 即轮周牵引力，它使车轮滚动前进。

机车在黏着力推动下前进时，车轮的前进速度 v 总是低于车轮的圆周速度 $R\omega$ 。这是由于在 M 的作用下，轮轨接触面产生向后的弹性变形所致。这个现象称为蠕滑，蠕滑大小

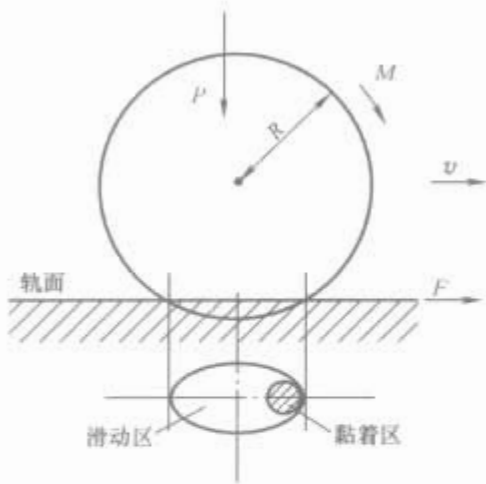


图 2.1-22 轮轨接触面切向力的产生的程度用蠕滑率 γ 来表示，定义如下

$$\gamma = \frac{R\omega - v}{v} \tag{2.1-1}$$

沿机车纵向传递的牵引力，即轮/轨间接触面上的切向移动力 F 与法向力 P 之比定义为（纵向）黏着系数 μ ，即

$$\mu = \frac{F}{P} \tag{2.1-2}$$

3.1.1.2 黏着牵引的特点

当机车处于黏着牵引的状态下，黏着系数可以作为一种量度，用来预测机车车辆在某一线路区段牵引相应列车的能力，也可以在有效黏着难以预测的情况下比较不同机车车辆在运行中的牵引能力。

车轮和钢轨之间的黏着系数随时间、地点、车轮和钢轨的状况而变化，即使在同一地点，随着钢轨状况、断面、轨道不平度、皱褶、线路横向断面的水平度、曲率、天气影响或其他污垢（例如雨、雪、冰、霜、背阴或朝阳、树叶、昆虫等）的变化，有效黏着系数的变化也比较显著。

钢轨的状况和污垢大致可认为是确定机车车辆与钢轨之间的有效黏着最重要和唯一的因素。黏着通常是针对状况良好的钢轨而言的，也就是钢轨已磨合、无锈、没有凸凹不平（例如皱褶、突然式下沉或凸起、接头不良或横向断面不顺）、无污垢。轨道的凸凹不平造成车轮之间承重的突然变化，导致接触力损失或下降，因此可能损失黏着力。车辆与钢轨之间的污垢使不空转时的牵引力大大降低。尽管任何车轮都可能空转，但是通常都是先导车轮首先接触到钢轨上的污垢，因此更容易发生空转。

黏着力还受车轮直径、轴重、机车速度等因素的影响。车轮直径影响轮轨接触面的大小，从而影响接触面的压强。试验表明，极限摩擦因数随压强的减小而增大。车轮直径大，接触椭圆面积大，压强小，能传递较大的切向力。国外专门试验研究表明，黏着系数随轴重增大而稍减，这是由于压强增大的缘故。动态黏着随机车运行速度增加而略有减少，因为速度增加时，轮轨间的接触状态发生了变化。当轨面干燥时，速度对动态黏着的影响很小。但当轨面上有水时，随着速度增大，动态黏着明显下降。这是因为车轮高速回转时，在轮轨间形成一层很薄的水膜，使轮轨实际接触面积减少，传递切向力的能力下降，使列车在潮湿轨面上加速运行时可能会发生空转。现时采用在轨面撒砂的办法来改善轮轨黏着，只有当砂粒有足够的颗粒直径和压强，在破坏水膜与污膜的前提下撒砂方能有效改善黏着。

3.1.1.3 黏着限制曲线

一般而言，随着车轮相对轨道的切向运动速度的加快（蠕滑率提高），能够有效施加的牵引力也将增大。但是当相对运动速度（蠕滑率）超过一定值后，能够传递的牵引力将

不再增大而是不断减少。这种能够传递的牵引力和车轮相对轨道的切向运动速度（蠕滑率）之间的关系称为黏着特性。机车正常牵引时，蠕滑率很小，且与形成的轮轨切向力成正比，称此段为“微滑段”；当驱动力矩 M 大到一定程度后，蠕滑率迅速增大，称此段为“佳滑段”；当驱动力矩进一步增大时，车轮相对于钢轨发生明显的大滑动，而轮轨之间能传递的切向力 F 随蠕滑率的提高而迅速下降，这段就发生车轮的空转。按蠕滑率进行黏着利用控制的策略就是实现在“佳滑段”工作状态的控制。

3.1.1.4 黏着牵引的动力装置

利用黏着牵引的驱动装置一般是由旋转电动机（直流或交流）产生动力，通过相应的机械传动装置（齿轮和传动连杆）传到轮轴上，再通过轮轨间蠕滑的作用形成牵引/制动力，推动或制动车辆。一旦轮轨间的传递力超过轮轨允许的最大黏着力（ $F > \mu P$ ），则会造成轮对空转或滑行，引起轮周力迅速丧失，此时车辆就不能实现牵引或制动运行。所以，旋转电动机驱动是一种受到轮轨黏着限制的驱动方式。

采用直流电动机的驱动方式称为直流传动方式，采用交流电动机的驱动方式称为交流传动方式。在单相工频供电的方式下，前者也称为交-直流传动方式，后者也称为交-直-交流传动方式。直流传动方式虽然比较简单，但电动机维护成本高、效率低、转速低、质量和体积大、黏着利用不高，因此很难胜任大功率、高速轨道交通发展的需求，正在逐步被交流传动方式所取代。

直流传动和交流传动的特点对比见表 2.1-4。

表 2.1-4 直流传动和交流传动的特点对比		
项 目	直流传动	交流传动
质 量	重	轻
体 积	大	小
功 率	小	大
黏着利用	低	高
转 速	低	高
维护保养	多	少

3.1.2 非黏着牵引的动力模式

3.1.2.1 非黏着牵引概念

非黏着牵引是一种与黏着无关的驱动方式，它不通过轮轨的黏着作用而产生牵引力，而是完全通过不接触的空间电磁作用力而生成牵引/制动力，因而也不需要机械驱动装置传递轮轨力。由于没有齿轮、齿轮箱等部件，因而走行部分机械结构相对简单，机械传动效率较高（但电气效率低），是一种全天候的系统。

目前非黏着牵引的动力模式主流是直线电动机驱动方式，是科技界、工业界一直追求的一种典型的非黏着驱动技术模式。而直线电动机驱动方式的牵引力传递途径与旋转电机完全不同，它不需要中间的机械传动装置环节，而是利用直线电动机的车载短定子与地面感应板（转子）或地面长定子与车载电磁铁（转子）的直接电磁作用（也可视为直线电动机自身的作用），产生牵引力/制动力，完全不需借助轮轨相互作用，所以它被称之为非黏着牵引的驱动系统，这也正是直线电动机驱动方式的实质所在。

典型的非黏着牵引的应用实例是磁浮交通装置，该装置没有轮轨接触，只能通过空间电磁场作用力方式获得非黏着牵引力。上海于 2004 年 1 月开通运营了世界上第一条高速磁浮交通线，从龙阳路到浦东机场，最高时速 430km。世界

范围内的城市轨道交通中的中低速磁浮交通线，也是非黏着牵引的运营案例，如日本的 HSST 磁浮铁路系统。另外，还有一种非黏着牵引的应用实例是轮轨支承的直线电动机推进的城轨车辆系统，因为虽有轮对，但不传递牵引力，轮对只起支撑作用，所以也属于非黏着牵引的动力模式，案例有加拿大多伦多地铁、温哥华地铁、日本东京都营地铁 12 号线、日本大阪市营地铁 7 号线、日本横滨市营地铁 4 号线、美国纽约肯尼迪机场线和广州地铁 4、5 号线等。一般，采用非黏着牵引方式的地铁车辆是为了解决在线运营坡度特陡、线路曲线太小、隧道太深且要求截面积小等特殊地段修建城轨交通的难题。

3.1.2.2 非黏着牵引的直线电动机推进原理

直线电动机牵引方式最早是日本和德国分别在研发超导和常导磁浮列车时提出的。日本开发的称为高速地面运输系统（HSST），德国开发的称为超高速系统。传统的轮轨高速列车由于高速轻量化和高速气动力学等影响导致轮重减载，以及高速下轮轨间污垢出现流体性，使高速轮轨黏着的发挥受到很大的影响，轮轨黏着限制成为制约轮轨高速列车速度进一步提高的主要瓶颈。例如，欧洲轮轨高速列车黏着系数的利用极限值：起动时取 0.2；100km/h 时取 0.17；300km/h 时仅取 0.09。因此，就需要开发出一种与“黏着”无关的驱动系统。1971 年，德国制造的第一辆磁浮原理车（MBB），采用车辆侧短定子直线电动机驱动方式，直到 1975 年 HMB 试验率先实现了线路侧长定子直线同步电动机驱动方式，为德国的 TR 磁浮高速铁路技术奠定了基础。1974 年，日本的 HSST 电磁悬浮列车取得试验成功，也采用了电磁悬浮和直线电动机驱动方式。而日本独树一帜的是低温超导的电动悬浮高速列车系统，也证明可将长定子直线同步电动机推进的磁浮系统用于高速轨道交通，运行速度在 500km/h 以上。

直线电动机可以视为一台旋转电动机沿半径方向切开而展平的感应电动机，定子（铁心和线圈）和转子（感应板）分别安装在车辆转向架上和轨道中间的导轨上，与普通旋转感应式电动机的原理一样，只不过其运动方式由旋转变为直线运动，见图 2.1-23，仍构成了感应电动机的作用机理。这种驱动方式的最大特点是牵引力不再受到轮轨黏着的限制，而取决于该定子—转子系统的电磁力作用，因而是一种非黏着牵引方式，能在车辆与导轨无接触情况下传递牵引力/制动力。直线电动机牵引同样可以利用 VVVF 变流器控制定子磁场的变化，以产生相应的牵引力/制动力，达到驱动列车加速和减速的目的。为保证一定的牵引力/制动力，直线电动机定子和转子间气隙必须要控制在一定的范围内。

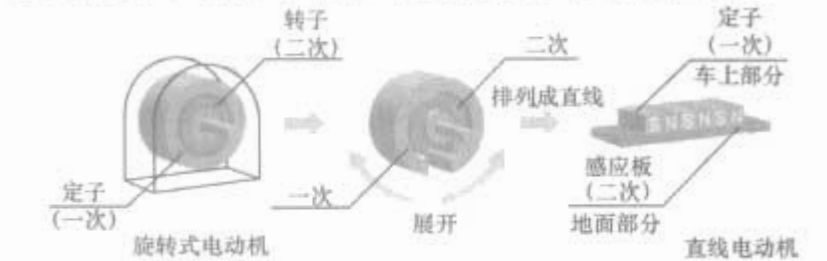


图 2.1-23 从旋转式电动机展开为直线电动机

直线电动机有 2 种推进方式：①定子绕组安装在车辆上，长转子安装在轨道中间的导轨上，它的优点是包括转子在内的轨道结构简单，运营成本低；②长定子绕组安装在地面上，转子安装在车辆上，它的优点是不需要给车辆受流，能适应高速运行，但包含定子的轨道结构太复杂，制造和运营维护成本较高，且环境对装备的使用寿命有严重影响。

直线电动机推进系统一方面不需要中间传动装置，可以

减少传动损耗（一般传动效率取 0.975），有利于提高效率 and 降低噪声；而另一方面为了确保运行安全的需要，直线电动机车载定子（铁心和线圈）和地面转子（感应板）的气隙不能取旋转电动机那么小（一般为 1~2mm），一般采用 10mm 左右。这样却造成了直线电动机效率特别低下，其效率一般仅为 0.6~0.7（旋转电动机可以达到 0.9 以上），这是直线电动机推进的最大不足之处。也就是说直线电动机驱动的地铁车辆，其运行能耗要比旋转电动机推进的地铁车辆要高。

3.1.2.3 非黏着牵引的特点

（1）优良的动力性能。由于车辆的运动是依靠直线电动机所产生的电磁力来推进，不再受到轮轨黏着因素的制约。因此，车辆可以获得很强的起动、加速和减速动力性能，尤其具有突出的爬坡能力，并能在恶劣的环境和轨面条件下保持良好的性能。有利于轨道交通线路高架和地下隧道工程纵断面大坡度的选择，降低工程造价。

（2）易于实现径向转向架。由于采用直线电动机推进方式，即使对于轮轨支承方式的车辆，因车轮不再传递牵引力/制动力，转向架轴箱定位结构可简化，可实现较小的轴箱定位纵、横向刚度，达到柔性定位。再加上轴间无传动装置和电动机安装，所以转向架固定轴距可以做得比较短，这样就较容易实现结构简单的径向转向架，提高车辆的曲线通过性能和运行平稳性，有利于轨道交通运营线路选择更小的曲线半径。

（3）横断面结构的小型化。由于直线电动机牵引方式不需要中间传动装置，车辆下部限界不构成对结构的约束。即使是轮轨支撑形式的地铁车辆，因可以采用较小的车轮，以及不需要旋转电动机的悬挂安装空间，车辆地板面可降至距轨面较低的高度，实现车辆断面小型化措施，这样对地铁隧道横断面的选择极为有利。线路工程断面小型化后，可大大降低土建工程的造价。据测算，地下工程造价大约可降低 20% 左右，高架工程大约可降低 30% 左右。

（4）降低振动和噪声。由于直线电动机牵引的车辆，没有齿轮传动机构的啮合振动和噪声。即使有支撑车轮，因不是驱动轮，没有动力轮对钢轨蠕滑滚动产生的振动和噪声。又因易实现径向转向架的曲线通过良好性能，避免了过曲线时轮轨冲角带来的振动和噪声。因此具有振动小、噪声低的优点，有利于环境保护。

（5）良好的安全性和可靠性。由于直线电动机牵引车辆是典型的非黏着牵引的动力方式，牵引/制动性能发挥不依赖于环境，是一种全天候的运载工具。直线电动机推进的电磁力的分力会产生一定的附加压力，有利于提高列车运动的稳定性，因此其安全性指标较高。再加上取消了旋转电动机驱动所必需的滚动轴承、传动齿轮的磨损器件，大大提高了车辆运行的可靠性和可维护性，维修工作量较小，维护成本较低。

（6）低效率、低功率因数的缺点。车辆上工程应用的直线电动机，由于车载定子与地面转子是处在一个相对直线运动的弹性（轴箱垂向弹性定位）系统间，不可避免地会造成相互间隙变化，因此气隙设计得不能太小，否则会导致不安全因素。再加上直线电动机是有端部的（旋转电动机是闭环），因此漏磁场较大，机电能量转化率低，效率较低，功率因数也较低。与采用旋转电动机的车辆相比，电耗要高出 20%~40%。另外，对于直线电动机气隙的安装、运行、保养、维护较困难，如何确保运行中气隙的精度是直线电动机推进车辆应给予高度关注的技术难题，为此所需的工作量和维护成本较高，也容易引发安全性问题。

3.1.3 客车电气系统

我国干线铁路客车供电方式有 3 种：

(1) 车轴驱动式发电机供电。一般采用车轴式驱动或柴油机驱动，在我国主要用于早期的 22 (25B) 型客车和 22 型翻新改造客车 (见图 2.1-24)。

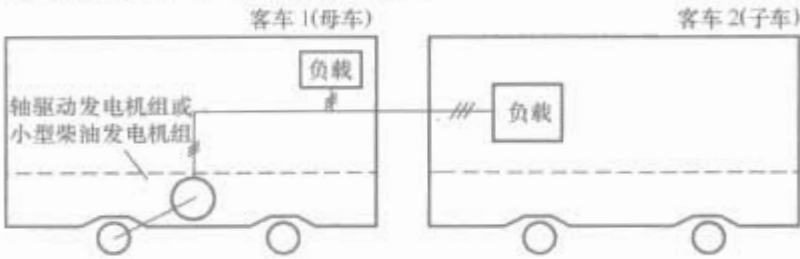


图 2.1-24 客车单独供电示意图

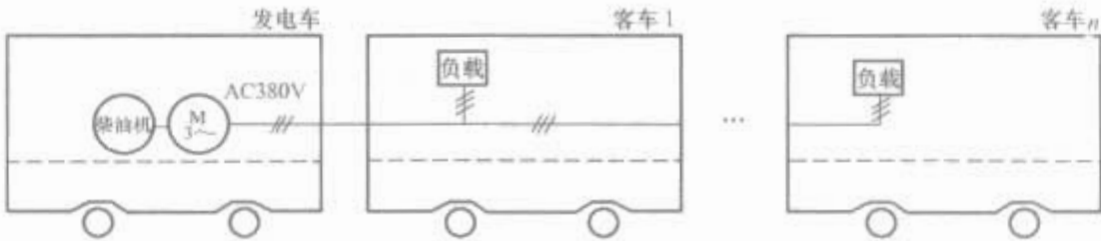


图 2.1-25 发电车供电示意图

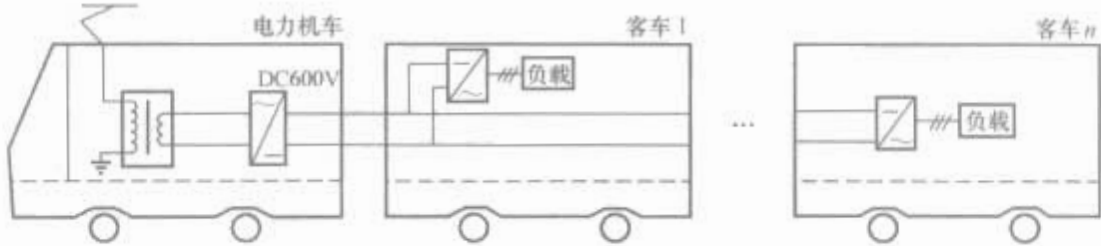


图 2.1-26 DC600V 供电示意图

目前干线铁路电气化区段，客运 (SS₃、SS₇、SS₉) 电力机车的列车供电装置将受电弓接受的 25kV 单相高压交流电降压、整流、滤波成 600V 直流电。为了供电的可靠性，机车上一般都安装了 2 套 DC600V 电源装置。2 套装置分 2 路通过 KC20D 连接器向空调客车供电。空调客车通过电气综合控制柜自动 (按车厢号分奇偶选择) 将其中一路 DC600V 直流电送入空调逆变电源装置 (简称逆变器) 及 DC110V 电源装置 (简称充电器)。逆变器将 DC600V 直流电逆变成三相 50Hz 交流电，向空调装置、电开水炉等三相交流用电负载供电；充电器将 DC600V 直流电变换成 DC110V 直流电，给蓄电池组充电，同时向照明、供电控制等负载供电。

25T 客车采用 2×35kW 逆变器供电，2 台逆变器中一台主要给空调机组供电，另一台给电开水炉、伴热器等交流负载供电。正常情况下，2 台逆变器相互独立，互为热备份。但当其中一台发生故障时，由另一台负责继续向负载供电，只是部分受控负载要减载运行 (如空调机组转入半冷或半热工况)。客室电热器、温热水器等电阻性负载，采用 DC600V 直接供电的方式。一方面减轻了逆变器的冬季负载，另一方面减轻了电阻性负载引起的漏电流。

由于电气化区段每隔 25km 左右便有一个分相区 (即无电区)。逆变器在过分相区时停止输出，也没有三相交流输出。为了避免照明负载的频繁断电，照明负载采用 DC110V 直流供电；在牵引区段，由充电器向照明负载供电；而过分相区时则由安装在车下的蓄电池供电。同样，为了保证空调等控制电路的控制电器不频繁吸合和释放，控制电路也采用 DC110V 供电。为了防止本车蓄电池放亏或故障，保证重要负载 (如轴温报警器等) 的供电，全列蓄电池通过阻断二极管并联。尾灯、电话等设施从延续性的角度考虑仍采用

(2) 空调发电车集中供电。由空调发电车的柴油发电机组集中供电，输出 AC400/230V 三相工频电源。在我国主要用于中期 KD25G 型空调发电车配套的 25G 和 25K 型客车 (见图 2.1-25)。

(3) DC600V 直流集中供电。在电气化区段运行时，电力机车或电动车组中的列车供电装置集中输出 DC600V 电源供给客车，在客车中分散逆变为 AC380V、50Hz 三相电；在非电气化区段运行时，内燃机车本身带有辅助柴油发电机组，可发出 AC380V、50Hz 三相电源直接供给客车，也可将发电机组输出整流为 DC600V 方式再向客车供电，在客车中分散逆变为 AC380V 电源。在我国主要用于 25T 型客车及电动车组 (见图 2.1-26)。

DC48V 供电。

3.2 牵引供电

轨道电力牵引交通系统是以电能来转化成牵引动力的，如何将电能从电网输送到牵引机车或动车上，就形成了一个牵引供电技术系统，它的任务是电能的输配和运动状态下的受流。受流首先要构成供电接触网，可分为不同电压等级、电流制式和接触网结构的供电接触网。从结构上以接触网悬挂方式分为柔性架空接触网、刚性架空接触网和接触轨 (三轨)。

3.2.1 交流制式供电

交流供电主要是通过电力系统牵引变压器将输电高电压降至额定电压值，再通过柔性架空接触网输电，并采用分相绝缘段实现三相的交替使用，以达到负荷分配均衡。

世界上交流制式最多的是单相工频制式，供电电压等级多数为额定电压 25kV，额定频率 50Hz，约占交流供电电气化铁路总里程的 70% 以上。此外，还有额定电压 15kV、 $16\frac{2}{3}$ Hz 和少量 11kV、25Hz 的非标准交流供电制式。现在，除已经使用这种非主流供电制式的国家外，在其他地区已难以获得扩展采用。

对于单相工频 (50Hz) 制式而言，牵引变电所进线电压根据外部电源情况一般选择为 110kV 或 220kV；牵引变电所牵引侧母线上的额定电压为 27.5kV；接触网的标称电压应为 25kV，长期最高电压应为 27.5kV，短时 (5min) 最高电压应为 29kV，设计最低电压应为 20kV。

牵引网供电方式根据外部电源情况以及防干扰的要求，可供选择方式有直接供电方式 (带回流线)、吸流变压器 (BT) 供电方式或自耦变压器 (AT) 供电方式。各交流供

电方式的主要技术特点见表 2.1-5。

表 2.1-5 各交流供电方式的主要技术特点比较

项 目	直接供电方式	BT 供电方式	AT 供电方式
供电能力	供电距离 25~35km	供电距离 20~25km	供电距离 40~50km
供电臂长度	较短;分相较多	长;分相较少	长;分相较少
防干扰能力	差	较好	好
电力系统投资	较多	多	少
牵引供电系统投资	少	较多	多
维护工作量	较小	大	大
适应区段	各种线路条件	不适应大容量和 重载线路条件	适应大容量和 重载线路条件

(1) 直接供电方式。该方式由接触网 T 和钢轨 R 构成,牵引变压器输出直接通过接触网 T 和机车变压器回流至钢轨。为提高回流的可靠性,新的直接供电还采用了附加的回流线和吸上线,缺点是对通信的干扰大。直接供电方式的(带回流线)示意图见图 2.1-27。



图 2.1-27 直接供电方式（带回流线）示意图

(2) BT 供电方式。该方式是在直接供电的牵引网中增加了电压比为 1 : 1 的吸流变压器,其一次侧和二次侧分别接入接触网和回流线。由于吸流变压器一、二次侧匝数应保持平衡,故牵引负荷电流可通过吸上线全部“吸入”回流线,接触网和回流线构成了平衡回路,从而大大降低了对通信的干扰。BT 供电方式的示意图见图 2.1-28。

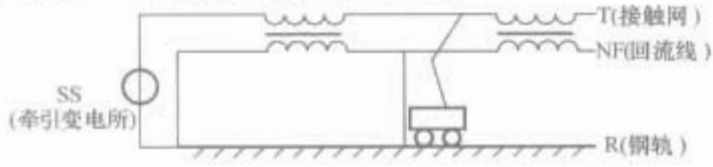


图 2.1-28 BT 供电方式示意图

(3) AT 供电方式。该方式牵引网不同于上述 2 种方式,它通过 2 : 1 的自耦变压器供电,其一次侧与接触网和正馈线相接,额定受电电压为 2×27.5kV,二次侧与接触网和钢轨相接。该方式由于在自耦变压器中点分接,两线圈安匝数相等,使 AT 网络构成了平衡回路,因此大大降低了对通信的干扰。该方式在牵引网保持对地绝缘电压不变的情况下,将供电能力提高了 1 倍,非常适用于高速和重载线路。AT 供电方式的示意图见图 2.1-29。

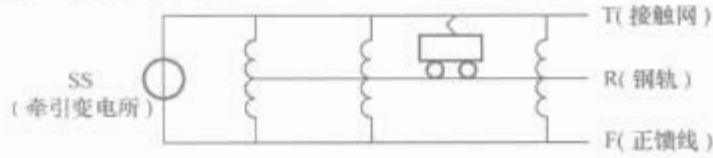


图 2.1-29 AT 供电方式示意图

3.2.2 直流制式供电

直流供电方式一般采用三相—多相变压器,通过多相整流产生直流电压,相数越多,供电直流电压的纹波越小。

3.2.2.1 主流供电制式

按照 IEC 推荐的直流供电方式电压规范,干线轨道交通(铁路)宜采用 3000V 的高压方式,因为铁路运能大、列车消耗功率高,采用高压方式能显著降低接触网的传输损耗。城市轨道交通由于运能相对较小,从安全角度考虑适宜

采用 600、750、1500V 的电压等级。上述 4 种电压的主流是直流供电制式。

欧洲干线铁路较多采用 3000V;我国北京、天津地铁均采用 750V 三轨受流,而上海、广州等后发城市的地铁均采用 1500V 电网受流。

3.2.2.2 其他供电制式

非主流制式主要是指供电电压在 600V 以下的一些制式,主要用在矿山和风景旅游区等运能很少的场合,从人身安全角度出发倾向于采用较低的供电电压。例如矿用机车多采用 220V 直流供电,一些电动旅游车采用 250V 交流供电。

3.2.3 磁浮交通供电方式

3.2.3.1 高速磁浮交通供电方式

由于高速磁浮列车的最高运营速度都在 400km/h 以上的特高速区域,采用接触式受流方式根本无法实现安全和可靠供电,因此,高速磁浮列车的牵引供电具有特殊性。作为推进动力要考虑采用长定子直线同步电动机置于地面轨道上,这样就解决了高速磁浮列车的牵引供电难题。以目前上海高速磁浮列车示范线为例,牵引供电系统由 1 个控制中心、2 座 110/20kV 主变电站和 2 座牵引变电站、7 座轨旁电站组成,其主变电站实施输配电功能,牵引变电站实施交—直—交 VVVF 变流对长定子同步电动机的供电功能,轨旁变电站实施对长定子分段供电的切换功能。

3.2.3.2 中低速磁浮交通供电方式

由于中低速磁浮列车的最高运营速度在 200km/h 以下,可以采用接触式受流方式向磁浮列车提供电能,因此作为推进动力的直线电动机可以考虑安置在列车的短定子直线异步电动机模式,这样更简单、可靠、经济。中低速磁浮列车的牵引供电系统可以采用类似于传统的轨道交通牵引供电技术。

3.3 通信与信号

近 20 多年来,在运输市场激烈竞争的压力下,各国铁路,特别是发达国家铁路为实现提速、高速和重载运输,积极采用新技术,大幅度提高了现代化通信与信号设备的装备水平,新型技术系统不断涌现。

3.3.1 信号系统

轨道电路是信号联锁的室外重要设备,起着保证行车和调车作业安全的作用。它能监督检查某一固定区段内的线路(包括站线)是否有列车运行、调车作业或车辆占用的情况,并能显示该区段内的钢轨是否完整。它是以钢轨为导线,轨缝间用接续线连续起来,一端接电源,另一端接着受电器,通过轨道电流来工作。

其工作原理是,当设有轨道电路的某段线路上空闲时,轨道电路上的继电器有足够的电流通过,吸起被磁化的衔铁,闭合前触点,从而接通色灯信号机的绿灯电路,显示绿色灯光,表示前方线路空闲,允许机车车辆占用,如图 2.1-30 所示。



图 2.1-30 轨道电路与信号联锁（绿）示意图

当机车车辆进入该线路区段时,由于轮对电阻很小,轨道电路短路,继电器吸力减弱,释放衔铁,从而搭在后触点上,接通信号机的红灯电路,显示禁行信号,如图 2.1-31 所示。

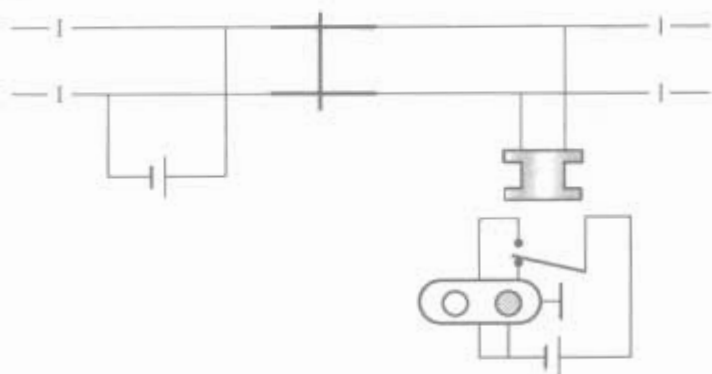


图 2.1-31 轨道电路与信号联锁（红）示意图

轨道电路的这一工作性能,能够防止列车追尾和冲突事故,确保行车安全。

轨道电路的另一个重要作用是发现钢轨断裂。在充当导线的钢轨正常时,轨道电流畅通无阻,继电器工作也正常。一旦前方钢轨折断或出现阻碍,切断了轨道电流,就会使继电器因供电不足而释放衔铁,接通红色信号电路。此时,线路虽然空闲,但信号机仍然显示红灯,从而防止列车颠覆事故。

铁路信号设备最初是作为铁路行车的一种安全设施发展起来的。随着经济的发展,铁路网越来越复杂,列车的速度与密度都在不断增加,对铁路信号设备的要求也越来越高。面对微电子、控制、信息技术的飞速发展,现代铁路信号系统已不仅仅是保障铁路安全运行的部分,而是整个铁路系统安全、高效运行的控制系统。

为了检查列车占用钢轨线路状态,1870 年美国人鲁宾逊发明了开路式轨道电路,1872 年研制成功了闭路式轨道电路,于 1873 年首先在宾夕法尼亚铁路试用,从此诞生了铁路自动信号。

我国铁路轨道电路技术从 20 世纪 50 年代中期开始,有了长足的发展,不仅传输的信息量增加,而且其使用已遍及全国铁路各线,构成了铁路信号技术发展的基础。铁路轨道电路技术先后经历了直流轨道电路和直流脉冲轨道电路、交流连续式轨道电路、交流计数电码、移频、高频轨道电路以及无绝缘轨道电路等,无绝缘轨道电路不但可以检测列车,而且可由钢轨线路向超速防护系统发送速度级别信息。

随着现代铁路向高速、重载、高密度发展,铁路信号系统也得到长足发展。现代铁路信号系统具有网络化、信息化和智能化特征,在网络化的基础上实现信息化,从而实现集中、智能管理,如北美的 ATCS 及欧洲的 CBTC。

轨道交通信号系统由列车自动控制系统(ATC 系统)和联锁设备两大部分组成。其中 ATC 系统又可分为列车自动防护(ATP)子系统、列车自动运行(ATO)子系统和列车自动监控(ATS)子系统的三个子系统。当前,列车自动控制系统(ATC)大体上分为两种制式,即基于数字轨道电路的准移动闭塞和基于感应环线通信的移动闭塞制式 CBTC 系统,或基于无线(Radio)通信虚拟闭塞制式 CBTC 系统。其中移动闭塞是今后 ATC 系统的主流。

国外许多先进国家的轨道交通建设,从 20 世纪 80 年代开始广泛采用先进的数字化信号系统,能确保列车运行达到最大的安全和效率。现在国际上著名的数字化信号系统供应商,有不少是著名的自动化系统制造商。阿尔卡特(Alcatel)公司在世界上较早推出 CBTC 系统,有比较成熟

的技术。

国内的城市轨道交通建设,从 20 世纪 90 年代起,建造或改造的北京、上海、广州和天津的地铁开始引进国外先进的地铁信号系统设备。国产信号系统由于多种原因,至今尚未形成完整的产品。目前已经可以投入使用,而且具有应用实例的只有 ATS 子系统。微机联锁设备虽然从 20 世纪 80 年代开始研发,而且在大铁路应用成功,但是因为与轨道交通 ATP 子系统成熟的接口,所以与地铁建设无缘。

3.3.2 通信系统

随着当代铁路的发展,铁路通信信号技术发生了重大变化,车站、区间和列车控制的一体化,铁路通信信号技术的相互融合,以及行车调度指挥自动化等技术,冲破了功能单一、控制分散、通信信号相对独立的传统技术理念,推动了铁路通信信号技术向数字化、智能化、网络化和一体化的方向发展。

从铁路信号系统纵向发展看,德国已经形成从 LZB、FZB 发展到 ERTMS 的发展趋势。LZB 利用轨道电缆环线传输列车运行控制系统行车指令和速度指令机车信号,取消地面闭塞信号机,保留闭塞分区,列车按固定闭塞方式(即 FAS)运行;FZB 是基于无线的列车运行控制系统,是新一代移动自动闭塞系统(即 MAS),其目的是实现低成本、高性能的列车运行控制系统,并已加入 ETCS;ERTMS/ETCS(欧洲铁路运输管理系统/欧洲列车控制系统)是欧盟支持的统一的行车控制系统,采用 GSM-R 作为传输系统,其成功应用将进一步推动铁路通信信号的技术进步,加快实现铁路通信信号一体化的进程。从信号系统的横向发展来看,日本新干线在 1995 年成功开发和投入运行的 COSMOS 系统,是通信信号一体化的又一个成功案例。该系统包含运输计划、运行管理、维护工作管理、设备管理、集中信息管理、电力系统控制、车辆管理、站内工作管理等 8 个子系统,以通信信号一体化技术,实现中心到车站各子系统的信息共享,并使系统达到很高的自动化水平。另外成功地应用了安全光纤局域网,使之成为联锁系统、列车运行控制系统的安全传输通道,达到通信技术与信号安全技术的深度结合,实现了通信信号一体化。

通信信号一体化是现代铁路信号的重要发展趋势,铁路信号技术发展所依托的新技术,与通信技术的技术标准是一致的,属于技术发展前沿科学,为通信信号一体化提供了理论和技术基础。在借鉴世界各国经验的基础上,结合中国国情、路情,我国已制定了中国统一的 CTCS 技术标准(暂行)。

3.4 运输管理信息化

信息化是全球普遍关注和竞争的焦点,是当今世界经济社会发展的大趋势,已经成为推动人类社会高速发展的强大动力,成为各个国家实现现代化的重大发展战略。

20 世纪中期以来,在世界范围内,信息技术带动了轨道交通行业整体技术的迅猛发展,行车指挥自动化、客货快运网络化、市场营销信息化、安全装备系统化,使传统行业的面貌焕然一新。实践证明,信息化是轨道交通行业发展的战略制高点和现代化的主要标志之一。

信息技术是能够延长或扩展人的信息能力的手段,是在计算机和通信技术支持下,用以获取、加工、存储、变换、显示和传输文字、数值、图像、视频、音频以及语音信息,并且包括提供设备和信息化服务的方法与设备的总称。对于轨道系统,以信息技术的概念,实现各业务管理与机电系统监控及综合自动化系统,如行车指挥与列车运行控制系统、编

组站综合自动化系统、客运管理自动化系统、铁路运输管理自动化系统及铁路货运管理自动化系统等均可纳入信息技术范畴。目前有较为经典的铁路运输管理信息系统（TMIS）、铁路列车调度指挥系统（TDCS）以及综合自动化系统（综合监控系统，ISCS）等几大内容。

3.4.1 铁路运输管理信息系统（TMIS）

铁路运输管理信息系统（TMIS）建设是一项规模庞大、结构复杂的系统工程，是实现铁路运输管理现代化的重要举措，是一项开拓性的事业。TMIS 投产运行后，系统的直接和间接用户多达上百万户，给全路运输组织、客货营销、经营管理带来了巨大的经济效益。TMIS 系统的建成投产，改变了运输管理手段落后的面貌，极大地强化了货物运输营销手段，实现了运力资源合理配置，提高了劳动生产率，标志着中国铁路信息化进程步入一个崭新的阶段。

运输管理信息系统以实现对货车、机车、集装箱的实时追踪管理为主要目标，逐步开发部、局、站段运输生产所需要的应用软件。TMIS 通过计算机网络从全路各主要站段中，实时收集列车、机车、车辆、集装箱以及所运货物的动态信息，对列车、车辆、集装箱和货物进行节点式追踪管理，实现货票、确报、编组站、区段站、货运站、货运营销及调度系统的计算机管理，为全路各级运输管理人员提供及时、准确和完整的运输信息和辅助决策方案，实现紧密运输、均衡运输，提高运输生产效率，改善服务质量。

3.4.2 列车调度系统

铁路列车调度指挥系统（Train operation Dispatching Command System，TDCS）是实现铁路各级运输调度对列车运行实行透明指挥、实时调整、集中控制的现代化信息系统。TDCS 由部级指挥中心、铁路局中心网络局域网及车站基层网组成，是一个覆盖全铁路的现代化运输调度指挥和控制系统。TDCS 利用信息技术、网络技术、控制技术等现代

化手段取代了传统落后的行车指挥手段，采用并结合了先进的通信、信号、计算机网络、数据传输、多媒体技术等现代信息技术，在保证网络安全的前提下，与相关系统紧密结合、互联互通、信息共享，实现了铁路运输组织的科学化、现代化，增加运能、提高效率，减轻了调度人员的劳动强度，改善了调度指挥的工作环境。

以 TDCS 为平台，组建分散自律、智能化、高安全性、高可靠性的新一代调度集中系统（简称 CTC），是实现铁路提速、高速以及减员增效的根本保障。中国铁路的总体战略发展思路就是以 TDCS 为平台，以调度集中（CTC）为核心，构建现代化的调度指挥管理信息系统，以现代运输的理念大力推动铁路运输调度指挥系统建设。

3.4.3 综合自动化系统（综合监控系统，ISCS）

轨道交通系统综合自动化系统系指各专业机电自动化系统采用统一的计算机硬件和软件平台，以协同行车指挥与列车运行为总目标的集成监控系统。

轨道交通客运业务主要由运营调度、车辆、供电、通信信号、环控与防灾、售检票等业务部门组成，各自动化系统相互衔接，各业务部门协同运作，是保证行车安全，高效运行的重要前提。ISCS 系统以行车指挥与列车运行监控业务为核心，完成各业务链的集成与协调，可最大限度地调动轨道交通系统内部各专业、各种设施，乃至不同营业线业务系统间、相关交通系统业务间协同运作的的能力。

目前，ISCS 系统已由各机电自动化子系统间简单的机间联系，发展成为各机电自动化系统的统一管理、集中监控、资源共享的复杂大系统。

综合自动化系统在国内也称作综合监控系统（Integrated Supervisory Control System，ISCS）或主控系统 MCS（Main Control System）。在现行国标 GB 50157—2003《地铁设计规范》中称为综合自动化系统。



第2章 牵引电气系统

1 电气牵引基本概念及牵引计算

1.1 牵引基本概念

牵引计算是以牛顿第二定律 $F=ma$ 运动方程式为基础的, 式中 F 为作用在列车水平纵坐标上的力, m 为列车的质量, a 为在力作用下使列车产生的加速度。当合力是正值时为加速过程; 负值时为减速度, 表示列车处于制动或者减速过程; 当合力是零时为匀速运动。列车在力作用下克服阻力从静止开始运动, 起动加速到一定速度, 然后牵引力等于阻力 (或者下坡坡道作用力等于阻力之和) 就作匀速运动; 牵引手柄在零位或者制动位, 则在制动力和阻力的作用下, 列车作减速度运行, 直到静止 (停车)。牵引计算的任务就是求取列车牵引、制动和惰行工况下的运动过程的物理量的关系, 即 $v=v(t)$, 运行距离 $s=s(t)$, 从而为铁路运输部门制定出合理的机车牵引定数和列车运行时刻表奠定基础。

作用在列车上的力是比较多的, 推动列车前进的力包括牵引力和下坡时重力的水平分力; 而阻力就有各种各样, 包括电气制动力、机械制动力、列车运动空气阻力、机械摩擦阻力、曲线阻力、列车上坡时的水平分力等。这些力的参数有些是已知的, 如机车和动车的牵引、电制动特性曲线是给出的; 有些是可以计算的, 如机械制动力; 有些是通过试验测量后, 制成的经验曲线, 如机车、动车和列车的运行空气阻力曲线、线路的曲线阻力、摩擦阻力等。在具体计算时, 合理准确地选取所需的阻力曲线和经验系数是十分重要而关键的。

铁道部非常重视牵引计算方法的制定, 组织有关部门专门制定了牵引计算的相关标准, 即列车牵引计算规程。通常一种新机车、车辆研制出来, 都会试验测量其牵引曲线和阻力曲线, 进行牵引计算后, 除了通过计算机进行对实际机型、运行线路区段作详细的计算外, 还通过实际牵引列车的试验运行, 反复记录区间的运行速度和时间, 多次修正, 然后制定出在该区间的牵引定数和列车运行时刻表。

此外, 对于电气牵引基础来说, 还必须认识两个重要的物理概念: ①牵引电动机由电能转变为机械能, 其旋转力矩通过齿轮传给机车动轮后, 动轮轮缘对轨道有切向力作用, 而轨道的切向反作用力, 就是推动列车前进的牵引力; ②机车和动车通过车轮和轨道作用能够发挥出来的牵引力 (制动力) 的临界值, 它等于动轮的正压力与动摩擦因数 (即黏着因数) 之乘积。黏着因数受到牵引和制动特性的陡度、车轮与轨道表面的接触状态、天气环境等因素的影响。这里仅作简要的说明, 后面在专门章节还要详细叙述, 至于计算中推导的公式是经典的公式, 其中有一些形式只是由于使用的单位不同而进行的换算。

1.1.1 牵引力的形成

电力机车和动车的牵引电动机将电能转变为机械能, 通过齿轮传给机车动轮, 这是产生牵引力的必要条件之一。另一必要条件是动轮与钢轨的相互作用。机车和动车牵引力的形成过程如图 2.2-1 所示, 牵引电动机小齿轮产生的力矩

M' 是内力, 不能使机车产生平移运动。若要使机车产生移动, 必须有机车以外的外力, 设在动轮上的力偶可用 F 取代力矩 M , 以动轮半径作为力偶臂。力偶的一个力 F 作用在动轮与钢轨接触点上。另一个力 F 作用于转向架的轴箱上。在任一瞬间, 施加于 C 点的力 F 都力图使动轮上的接触点沿钢轨向左移动, 但动轮受垂直载荷的作用, 紧压在钢轨上, 钢轨在垂直方向给动轮以必要的支承, 并且在水平方向承受动轮作用于钢轨的力 F , 而对动轮产生反作用力 F' 。这种动轮与钢轨的相互作用称为黏着, 这个由钢轨作用在轮周上的力 F' 就称为黏着力。力 F' 在数量上等于力 F , 而且作用线相重合, 但方向相反。因此, 在任一瞬间, 力 F 与 F' 在 C 点是平衡的, 动轮上的 C 点对钢轨来说是静止的, 它是动轮沿钢轨滚动的瞬时中心。由于力 F 和力 F' 在 C 点平衡, 释放了作用于动轮中心 O 的力 F 。这个力未被平衡, 它通过动轮轴箱传给转向架的构架, 使机车产生向右平移运动, 同时它使动轮围绕瞬时滚动中心 C 转动。这个力 F 始终与机车运动方向相同, 它就是机车的牵引力。必须指出, 作用于动轮中心的力 F 只是在有钢轨的反作用力 F' 存在的情况下, 才能成为使机车产生平移运动的外力。因此, 一般不是将力 F 而是将反作用力 F' 称为机车的牵引力。

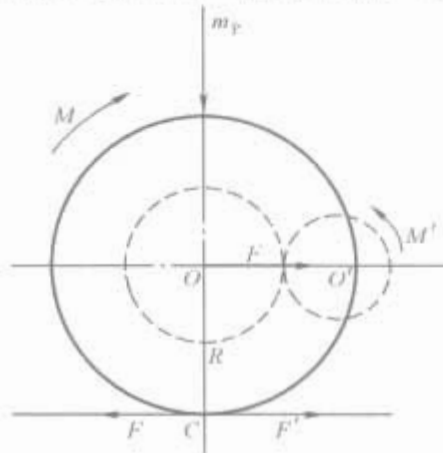


图 2.2-1 机车动车牵引力形成示意图

1.1.2 作用在列车上的力

列车在轨道上运行时, 有各种不同方向和不同大小的力作用在列车上。这些力可以分为 3 种:

(1) 机车牵引力 F 。它是由机车或动车的牵引电动机所产生, 并通过动轮与钢轨的相互作用而引起的外力。它与列车运行方向相同, 其大小可由司机控制。

(2) 列车运行阻力 W 。它是列车运行时由多种原因引起的阻止列车运行的外力, 其大小不能由司机控制。

(3) 列车制动力 B 。它是由机车和车辆上的制动装置所产生, 并通过轮对与钢轨的相互作用而引起的外力, 用来使列车减速或停车。它与列车运行方向相反, 其大小可由司机控制。

这 3 种力的不同组合形成作用于列车上的合力 C :

牵引运行时, 合力 $C=F-W$ 。

惰行时, 合力 $C=-W$ 。

制动时, 合力 $C=-(W+B)$ 。

F 、 W 和 B 都是随运行速度 v 变化的, 所以在不同速度

下,合力C也是变化的。列车牵引计算时,经常使用单位合力c,即作用在列车上的合力与列车重力之比

$$c=\frac{F-(W+B)}{(P+G)g}10^3=f-(\omega+b) \quad (2.2-1)$$

式中:c为单位合力,N/kN;F为机车牵引力,kN;W为列车运行阻力,kN;B为列车制动力,kN;P为机车质量,t;G为牵引质量,t;g为重力加速度, $g\approx9.81\text{ m/s}^2$;f、 ω 、b分别为单位牵引力、单位阻力、单位制动力,N/kN。

当作用于列车的单位合力c大于零时,列车加速运行;当c小于零时,列车减速运行;当c等于零时,列车运动状态保持不变,或静止不动,或等速运行。

1.1.3 轮周牵引力和车钩牵引力

根据力的传递过程,机车牵引力又可分为轮周牵引力和车钩牵引力。前面讲到的机车牵引力均是轮周牵引力;车钩牵引力是轮周牵引力克服机车本身运行阻力后的牵引力,由机车后钩传递到车辆上。我国和世界上很多国家,在牵引计算中,都以轮周牵引力作为计算标准。

每种机车都有自己的牵引特性曲线,即轮周牵引力与速度的关系曲线。这些曲线不仅是机车的性能指标,也是牵引计算必不可少的资料。

1.1.4 黏着牵引力和黏着因数

前面已经知道,在牵引力形成过程中,使机车移动的外力是反作用力F′(见图2.2-1)。这个反作用力仅在动轮与钢轨间有足够的黏着条件时才能产生,所以F′又称为黏着牵引力。黏着牵引力有一定极限值,一旦超过极限值,轮对将发生空转,牵引力迅速下降。为了防止空转,机车的黏着牵引力在任何情况下都应保持下列关系

$$F_{\mu}\leq P\mu g \quad (2.2-2)$$

式中:F_μ为机车的黏着牵引力,kN;P为机车质量,t;μ为机车的黏着因数。黏着因数与下列因素有关:

(1)动轮踏面与钢轨表面的状态。干燥轨面或附有薄锈,黏着因数较大;轨面潮湿,有冰、霜、雪或油垢等,黏着因数较小。

(2)线路的质量。钢轨越软或道碴下沉量越大,黏着因数越小。

(3)运行速度的高低。随着运行速度增高,加剧了动轮对钢轨的纵向和横向滑动及机车振动,黏着因数减小。

(4)机车有关部件的状态。如牵引电动机特性的差异、动轮直径的大小不同、各动轮间负荷分配不均、转向架牵引点的高低、牵引电动机的布置方式、轴重转移等,都对黏着因数有影响。

1.1.5 列车运行阻力

列车运行阻力可分为基本阻力和附加阻力两种。基本阻力是列车在任何情况下运行都存在的阻力;附加阻力是列车在某些特殊地段运行时,除基本阻力外增加的阻力,如坡道附加阻力、曲线附加阻力等。

1.1.5.1 列车运行基本阻力

引起基本阻力的主要因素有:①轮对轴颈与轴承间的摩擦;②车轮与钢轨的滚动摩擦;③车轮与钢轨的滑动摩擦;④列车在轨道上运行时产生的冲击和振动;⑤空气阻力。

由于影响基本阻力的因素极为复杂,在实际应用中很难用理论推导的公式来计算。通常是采用大量试验并通过数学综合处理得出的经验公式来计算。我国常用的机车车辆基本阻力计算公式^[1]如下,注意各式中基本阻力的单位为N/kN,速度单位为km/h。

电力机车SS₁、SS₃、SS₄型

$$\omega'_{0}=2.25+0.0190v+0.000320v^2 \quad (2.2-3)$$

电力机车SS₇型($v\leq100\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.40+0.0038v+0.000348v^2 \quad (2.2-4)$$

电力机车SS_{7B}型($v\leq170\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.23+0.0179v+0.000233v^2 \quad (2.2-5)$$

电力机车SS₈型($v\leq170\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.02+0.0035v+0.000426v^2 \quad (2.2-6)$$

电力机车SS₉型($v\leq170\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.75+0.0235v+0.00018v^2 \quad (2.2-7)$$

电力机车6K型($v\leq100\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=3.25+0.0092v+0.000308v^2 \quad (2.2-8)$$

电力机车8G型($v\leq100\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=2.55+0.0083v+0.000212v^2 \quad (2.2-9)$$

内燃机车DF₄型、DF_{4B}型、DF_{4C}型、DF_{4D}型($v\leq100\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=2.28+0.0293v+0.000178v^2 \quad (2.2-10)$$

内燃机车DF₈型($v\leq100\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=2.4+0.0022v+0.000391v^2 \quad (2.2-11)$$

内燃机车DF₁₁型($v\leq160\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=0.86+0.0054v+0.000218v^2 \quad (2.2-12)$$

客车21型、22型($v\leq120\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.66+0.0075v+0.000155v^2 \quad (2.2-13)$$

客车25B型、25G型($v\leq140\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.82+0.0100v+0.000145v^2 \quad (2.2-14)$$

准高速单层客车($v\leq160\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.61+0.0040v+0.000187v^2 \quad (2.2-15)$$

准高速双层客车($v\leq160\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.24+0.0035v+0.000157v^2 \quad (2.2-16)$$

“中原之星”电动车组($v\leq160\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.28+0.0012v+0.000195v^2 \quad (2.2-17)$$

“先锋”电动车组($v\leq200\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.65+0.0001v+0.000179v^2 \quad (2.2-18)$$

“长白山”电动车组($v\leq200\text{ km/h}$)

$$\omega'_{0}=1.09+0.0040v+0.00018v^2 \quad (2.2-19)$$

“中华之星”电动车组

$$\omega'_{0}=0.97-0.0059v+0.000167v^2 \quad (2.2-20)$$

滑动轴承货车(重车)

$$\omega'_{0}=1.07+0.0011v+0.000236v^2 \quad (2.2-21)$$

滚动轴承货车(重车)

$$\omega'_{0}=0.92+0.00048v+0.000125v^2 \quad (2.2-22)$$

空货车(不分车型)

$$\omega'_{0}=2.23+0.0053v+0.000675v^2 \quad (2.2-23)$$

1.1.5.2 线路坡道附加阻力

列车在坡道上运行时,除基本阻力外,还受到沿轨道方向重力的分力影响,这个分力就是线路坡道附加阻力,简称为坡道阻力。列车在上坡道上运行时,坡道阻力与列车运行方向相反,阻力是正值;下坡时,坡道阻力与列车运行方向相同,阻力为负值。

线路坡道的坡度以坡段终点对起点的高度差与两点间水平距离的比值计算,用*i*表示,单位为千分数(‰)。

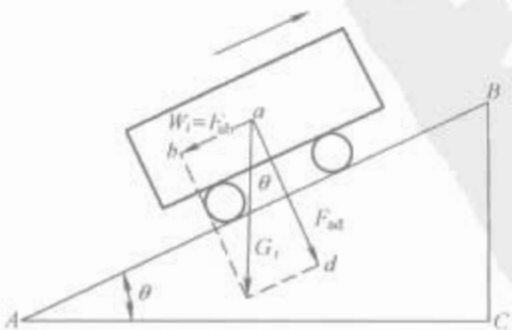


图 2.2-2 坡道阻力示意图

图 2.2-2 是一辆
车运行于坡道的示意

图。BC 为 AC 这段距离中标高上升的高度，坡度则为

$$i = \frac{BC}{AC} \times 1000 = 1000 \tan \theta \tag{2.2-24}$$

设车辆质量为 m_G ，其重力为 G_i ，将它分为 2 个分力，其中分力 F_{ad} 被钢轨垂直反力所平衡；另一个分力 F_{ab} 与轨道平行的，方向与运行方向相反，即为坡道阻力 W_i 。由几何关系可得

$$\frac{W_i}{G_i} = \frac{BC}{AB}$$

即

$$W_i = \frac{BC}{AB} G_i = G_i \sin \theta \tag{2.2-25}$$

车辆总质量的单位是 t，其重力 G_i 的单位为 kN，坡道总阻力 W_i 的单位是 N，为了统一成 N， G_i 应乘以 1000。通常线路坡道的 θ 很小，可以近似为 $\sin \theta \approx \tan \theta$ ，因此

$$W_i = 1000 G_i \tan \theta$$

平均到每单位重力上的坡道阻力为

$$\omega_i = \frac{W_i}{G_i} = 1000 \tan \theta \tag{2.2-26}$$

由式 (2.2-23) 和式 (2.2-25) 可知，单位坡道阻力 ω_i 在数值上与该坡道坡度的千分数相等，即 $\omega_i = i$ ，例如， $i = 6\text{‰}$ 时，单位坡道附加阻力 $\omega_i = 6\text{N/kN}$ 。

1.1.5.3 线路曲线附加阻力

列车进入曲线运行时，部分车轮轮缘压向钢轨侧面产生额外摩擦，车轮与轨面的纵向和横向滑动，以及转向架心盘、旁承处的摩擦加剧。这些在进入曲线而较直线运行增加的摩擦损失称为曲线附加阻力，简称为曲线阻力。它与曲线半径、列车运行速度、外轨超高和轨距加宽、机车车辆的轴距和轴载荷等许多因素有关。因此，很难用理论分析推导出 ω_r 它的计算公式，而采用综合经验公式。公式中只以最主要的因素曲线半径 R (m) 为变量。单位曲线附加阻力用 ω_r 表示，其公式的一般形式为 $\omega_r = A/R$ ，单位为 N/kN。常数 A 综合反映了其他影响因素。

1) 列车长度小于或等于曲线长度时

$$\omega_r = \frac{600}{R} \tag{2.2-27}$$

式中： R 为曲线半径。

2) 列车长度大于曲线长度时

$$\omega_r = \frac{10.5\alpha}{l_r} \tag{2.2-28}$$

式中： α 为曲线的中心角，(°)； l_r 为列车长度，m。

1.1.5.4 列车起动阻力

机车车辆停留时，轴颈与轴承之间的润滑油被挤出，油膜变薄，同时轴箱温度降低，油的黏度增大，故起动时轴颈与轴承的摩擦阻力增大。此外，车轮在停留中更深地压入钢轨，起动时车轮由钢轨凹处抬起，从而增加了阻力。另外，列车起动时，要求有较大的加速力，以克服列车的静态惯性力，或者称为由静态到动态的起动加速力。列车起动阻力的大小均由试验确定，一般滑动轴承货车的单位起动阻力为

$$\omega_q = 3 + 0.4 i_q \tag{2.2-29}$$

式中： i_q 为起动地段的坡度，‰。

若 ω_q 的计算结果小于 5N/kN，仍按 5N/kN 取值。

滚动轴承与滑动轴承相比，受力和油润滑情况有所不同，起动阻力较小。根据国外资料介绍，滚动轴承车辆的起动阻力约为滑动轴承的 1/5，这使列车质量不易受到起动条件的限制，对提高列车质量是有利的。

1.1.6 列车制动力

由司机操纵制动装置引起的、与列车运行方向相反的外力称为制动力。产生制动力的方法很多，按列车动能转移方式来说，目前在机车车辆上广泛使用的有机械制动和电气制动两种，可再细分为踏面制动、盘形制动、电阻制动、再生制动、磁轨制动和涡流制动等制动方式。

1.1.6.1 踏面闸瓦摩擦制动力的计算方法

制动时，由闸瓦压力而在轮墙面上产生的摩擦制动力 B 有如下 2 种计算方法：

(1) 实算法。分别以机车及各种车辆的实算闸瓦压力 K 乘以其对应的实算摩擦因数 φ_k ，再将各乘积相加而得列车的制动力。

机车车辆每块闸瓦的实算闸瓦压力 K 与制动缸空气压力、制动缸直径、制动倍率、传动效率、制动缸数及闸瓦数等有关。影响闸瓦与车轮间摩擦因数 φ_k 的因素中，除闸瓦和车轮的材质及硬度、列车运行速度、制动初始速度、闸瓦温度外，还随闸瓦压力变化而变化。因此，用实算法计算制动力比较繁琐，尤其当列车中有各种类型的制动机时，要先分别计算其实算闸瓦压力，再根据不同的实算闸瓦压力分别计算出对应的实算摩擦因数，计算非常麻烦。所以一般采用计算较简便的换算法。

(2) 换算法。换算法的实质是，不论实际闸瓦压力多大，都采用一个固定的闸瓦压力值所对应的摩擦因数（称为换算摩擦因数）。同时按制动力等效的原则将各实际闸瓦压力折算为换算闸瓦压力。这时只要把列车中所有机车车辆的换算闸瓦压力加在一起与换算摩擦因数相乘，即可得出全列车的制动力。计算公式如下

$$B = \varphi_h \sum K_h \tag{2.2-30}$$

式中： φ_h 为换算摩擦因数； $\sum K_h$ 为列车中换算闸瓦压力之和，kN。

参考文献 [1] 中有换算摩擦因数 φ_h 和换算闸瓦压力 K_h 的计算公式。为了计算方便，还将各型车辆分类，分别定出每类车辆换算闸瓦压力平均值，并列表备查。

列车换算闸瓦压力的总和与列车重力之比称为列车换算制动率，用 β 表示。根据 β 可求得列车的单位制动力 b ，即

$$b = \frac{B}{(P+G)g} 10^3 = \frac{\sum K_h}{(P+G)g} \varphi_h \times 10^3 = \beta \varphi_h \times 10^3 \tag{2.2-31}$$

式中： B 为列车制动力，kN； P 为机车质量，t； G 为牵引质量，t。

1.1.6.2 电阻制动和再生制动（参见本章第 6.2 节）

1.1.6.3 磁轨制动和涡流制动

目前高速旅客列车的运行速度已达 250~300km/h，若强大的制动功率只靠踏面闸瓦制动和盘形制动来提供，不但制动距离长，而且由于摩擦载荷过大，会导致机械部件和车轮踏面或制动盘的磨损，热损坏急剧增加。虽然在高速动车上还采用了动力制动，但这些制动方式产生的制动力均受轮轨间的黏着限制，高速运行时，黏着因数是一个不大的有限值。

为了适应高速运输的需要，在高速动车组上还增设了磁轨制动或涡流制动。前者又称电磁轨道制动，后者又称电磁涡流制动。

(1) 磁轨制动是利用装在转向架上的制动电磁铁通电励磁后吸在钢轨上，电磁铁极靴压在轨面上滑行产生摩擦力，即制动力。制动电磁铁悬挂在转向架两侧的两个车轮之间，

距轨面位置有高、低两种。低悬挂距轨面 6~10mm, 用弹簧支持。制动时, 电磁铁励磁, 克服弹簧力直接吸在轨面。高悬挂时由工作缸中的弹簧作用, 在非制动时保持电磁铁处于高位置, 距轨面 120~160mm, 制动时电磁铁被压缩空气压向轨面并励磁。

磁轨制动的优点是不受黏着限制, 制动时不会发生轴重转移, 还在一定程度上使轴重稍有增加, 制动电磁铁在轨面上摩擦时有清扫作用, 能改善轮轨间的黏着状态; 其缺点是电磁铁在钢轨上摩擦引起钢轨表面局部过热, 容易导致钢轨损伤, 一般都在紧急制动时作为一种辅助制动方式使用。

(2) 涡流制动与磁轨制动相似, 也有一个强大的电磁铁, 它与钢轨之间的相对运动引起电磁力, 从而形成制动力。电磁铁长 1200~2000mm, 安装在转向架两侧的 2 个车轮之间, 距轨面仅 6~7mm, 电磁感应体是钢轨。制动时, 电磁铁被励磁, 由于电磁铁与钢轨的相对运动, 在钢轨头内产生感应涡流, 从而产生电磁力, 并通过电磁铁传给运动着的车辆, 形成制动力。制动力的大小可通过改变励磁电流大小来调节。这种制动力不受黏着限制, 电磁铁与钢轨不接触、无磨损, 但由于涡流, 钢轨发热比较严重, 两次使用之间必须考虑一定的时间间隔。

1.1.7 列车运动方程

列车运动方程是单位合力与列车加速度的关系式, 可作为解决运行时间、运行距离、运行速度等问题的依据。

(1) 列车运行方程

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{1+\gamma} c = \zeta \quad (2.2-32)$$

式中: ξ 为单位换算系数; γ 为回转质量系数; c 为作用于列车上的单位合力; ζ 为加速度系数。

(2) 回转质量系数

$$\gamma = \frac{m_0}{m} = \frac{\sum I}{R^2} \quad (2.2-33)$$

式中: m_0 为机车或车辆回转部分的当量质量; m 为机车或车辆的质量; I 为回转部分的转动惯量; R 为回转部分的回转半径。

各种机车车辆的结构不同, 其回转质量系数也不相同。通常取机车车辆的综合回转系数平均值为 $\gamma=0.06$ 。

(3) 加速度系数

$$\zeta = \frac{\xi}{1+\gamma} \quad (2.2-34)$$

由于铁路上加速度的单位除用 m/s^2 表示外, 还用 $km/(h \cdot s)$ 、 $km/(h \cdot min)$ 或 km/h^2 表示。因此, 加速度系数的数值不同。

最常用的三个列车运动方程是

$$\frac{dv}{dt} = 120c \quad (km/h^2) \quad (2.2-35)$$

$$\frac{dv}{dt} = 2c \quad [km/(h \cdot min)] \quad (2.2-36)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{30}c \quad [km/(h \cdot s)] \quad (2.2-37)$$

以式 (2.2-36) 为例, 用文字说明如下: 当列车上作用的单位合力 c 为 $1N/kN$ 时, 列车的加速度为 $2km/(h \cdot min)$ 。

1.2 牵引计算

1.2.1 牵引质量的计算

对于一定功率的机车来说, 牵引质量和运行速度是相互关联的, 牵引质量增加, 列车速度降低; 提高列车运行速

度, 牵引质量相应减少。

牵引质量和列车运行速度是铁路运输工作中的两个重要指标, 它们反映铁路运输的生产能力和科学技术发展水平。

旅客列车的质量和速度一般根据列车种类确定, 我国旅客列车的编组已由过去的 13~14 辆提高到 18~20 辆。主要干线上旅客列车的最高速度为 110~120km/h, 快速线将提高到 140~160km/h。高速客运专线提高到 200km/h 以上。列车阻力中空气阻力与速度的平方成正比, 因此提高列车质量和速度都要求增加机车功率。国外高速旅客列车的速度已达 250~350km/h, 列车最大功率已超过 12000kW。

货物列车的质量和速度也与很多技术经济指标有关。牵引计算是结合线路中情况, 从充分发挥机车工作能力的角度计算列车的牵引质量。计算方法可分为限制坡道上等速运行法和动能闯坡法两种。计算公式如下:

(1) 限制坡道上等速运行法

$$G = \frac{F_t - P(\omega'_0 + i_x)g \times 10^{-3}}{(\omega''_0 + i_x)g \times 10^{-3}} \quad (2.2-38)$$

式中: F_t 为机车计算牵引力, kN; P 为机车质量, t; ω'_0 为对应计算速度 v_1 时的机车单位运行基本阻力, N/kN; i_x 为限制坡道坡度, ‰; ω''_0 为对应计算速度 v_1 时的车辆单位运行基本阻力, N/kN。

(2) 动能闯坡计算法。动能闯坡是指列车在短而陡的坡道上运行时, 可以利用机车的牵引力和坡前储存的动能, 使列车以不低于机车计算速度闯过坡顶。这种坡道称为动力坡道, 限制牵引质量的动力坡道称为动力限制坡道。

动力限制坡道上列车牵引质量与坡道运行速度、坡道的坡度和长度等因素有关。这些因素的关系比较复杂, 难以用公式一次计算出来, 通常用试凑法计算。采用试凑方法时, 所求的列车牵引质量通过坡顶的速度应恰好是机车的计算速度。

1.2.2 牵引质量的校验

计算所得的牵引质量还必须按下述各项进行校验; 若受限制, 则需降低牵引质量。

1.2.2.1 起动校验

根据机车起动牵引力 F_q 、机车车辆起动阻力, 计算出在起动坡道 i_q 上所能起动的最大列车质量 G_q , 与已求得的牵引质量 G 进行比较。计算公式如下

$$G_q = \frac{F_q - P(\omega'_q + i_q)g \times 10^{-3}}{(\omega''_q + i_q)g \times 10^{-3}} \quad (2.2-39)$$

式中: F_q 为机车起动牵引力, kN; P 为机车质量, t; ω'_q 为机车的单位起动阻力, N/kN; i_q 为起动坡道的坡度, ‰; ω''_q 为车辆的单位起动阻力, N/kN。

计算结果应满足 $G \leq G_q$ 。

1.2.2.2 车站到发线有效长度的校验

受区段内最短车站到发线有效长度限制的列车牵引质量 G_e , 可按下式计算

$$G_e = \frac{(l_e - l_j - l_s - 30)}{l_p} G_p + G_s \quad (2.2-40)$$

式中: l_e 为最短的车站到发线有效长度, m; l_j 为机车长度, m; l_s 为守车长度, m; 30 为安全距离, 取 30m; l_p 为每辆货车的平均长度, m; G_p 为每辆货车的平均质量, t; G_s 为守车质量, t。

无守车时, l_s 和 G_s 为零。计算结果应满足 $G \leq G_e$ 。

1.2.2.3 其他校验

其他校验还有长大下坡道的牵引辆数受制动机充风和空走时间的限制、牵引电动机发热校验限制、小半径曲线上机车黏着牵引力降低限制等。

1.2.3 列车制动计算

列车制动计算主要是在不同线路条件下,求解列车换算制动率、列车速度和列车制动距离三者之间的相互关系。

求解列车制动距离(或求制动末速度)可用公式直接计算。与求解制动初速度(或列车制动率、线路的坡度)原理相同,但计算较繁杂,因空走距离和换算闸瓦摩擦因数等都和制动初速有关,一般用试凑法。

1.2.3.1 制动距离的概念

从司机施行制动时起到列车停车止,列车所运行的距离称为制动距离。各国铁路对紧急制动距离的数值都有规定,一般在700~1200m之间,我国铁路未提速前规定为800m。随着列车质量和速度的提高,制动距离将有所延长。国外高速旅客列车的制动距离已达3000m以上。我国高速列车紧急制动距离的推荐值:速度200km/h时为1800m;250km/h时为2700m;270km/h时为3300m;300km/h时为3700m。

司机施行制动后,即使机车本身或第一辆车也要经过一段短暂时间制动缸才开始有空气压力,然后压力逐渐上升,再过一段时间才达到最大值。车辆所在位置不同,开始升压时间也各不相同。因此,全列车的制动力不是立即产生达到最大值的,而有一个过程。这一过程受很多因素的影响,也很复杂,因而按列车制动力实际增长的过程计算制动距离是很不方便的。

为了便于计算,通常假定由司机施行制动时起,经过一段时间后,全列车闸瓦压力同时由零立即增加到最大值,这段假定的时间称为制动空走时间。在此期间内,列车所运行的距离称为制动空走距离,从制动空走时间以后直到列车停止的时间称为制动有效时间,期间列车所运行的距离称为制动有效距离。求出的制动距离必须满足等效原则。

制动距离 s_z 的计算公式如下

$$s_z = s_k + s_e \quad (2.2-41)$$

式中: s_z 为制动距离,m; s_k 为制动空走距离,m; s_e 为制动有效距离,m。

1.2.3.2 制动空走时间

列车制动空走时间 t_k 与列车编组辆数、制动波数、制动机类型以及各种不同制动机的车辆编在列车中的位置等因素有关。一般空走时间的计算公式由试验确定。参考文献[1]中的计算公式如下。

旅客列车:

$$\text{紧急制动 } t_k = 3.5 - 0.08i_j \quad (2.2-42)$$

$$\text{常用制动 } t_k = (4.1 + 0.002m)(1 - 0.03i_j) \quad (2.2-43)$$

货物列车:

$$\text{紧急制动 } t_k = (1.6 + 0.065n)(1 - 0.028i_j) \quad (2.2-44)$$

$$\text{常用制动 } t_k = (3.6 + 0.00176m)(1 - 0.032i_j) \quad (2.2-45)$$

式中: t_k 为制动空走时间,s; i_j 为加算坡度坡度,‰; r 为列车管减压量,kPa; n 为牵引车辆辆数。

上坡道的制动空走时间按平道计算。单机不分类型,均按紧急制动2.5s计算。

1.2.3.3 制动空走距离

列车制动空走距离 s_k 按制动空走时间内,列车以制动初速等速运行计算,即

$$s_k = \frac{1000v_0 t_k}{3600} = \frac{v_0 t_k}{3.6} \quad (2.2-46)$$

式中: s_k 为制动空走距离,m; v_0 为制动初速度,km/h; t_k 为制动空走时间,s。

1.2.3.4 制动有效时间

列车制动有效时间 t_e 的计算公式如下

$$t_e = \sum \frac{30(v_1 - v_2)}{1000\vartheta_h \varphi_h + \omega_0 + i_j} \quad (2.2-47)$$

式中: t_e 为制动有效时间,s; v_1 为制动初速度,km/h; v_2 为制动末速度,km/h; ϑ_h 为列车换算制动率; φ_h 为闸瓦换算摩擦因数; ω_0 为列车运行单位基本阻力,N/kN; i_j 为计算坡度坡度,‰。

1.2.3.5 制动有效距离

制动有效距离 s_e 的计算公式如下

$$s_e = \sum \frac{4.17(v_1^2 - v_2^2)}{1000\vartheta_h \varphi_h + \omega_0 + i_j} \quad (2.2-48)$$

1.2.4 列车运行速度和运行时间的计算

列车运行速度和时间的计算方法很多,分析计算法是其中之一。分析计算法是具备单位合力曲线和线路纵断面的具体情况下,由列车运行方程直接求解列车运行速度和时间的办法。由列车运行方程可知,单位合力 F_t 的大小与速度的变化有关。在运动中列车速度不断地变化,牵引计算时,要想每时每刻都根据运行速度的大小去计算和查找相应的单位合力有一定困难。实际上,列车运动方程的求解是采用近似计算。

(1)将速度的连续变化分截成若干 Δv 小段,每个分段 Δv 表示分段两端的初速 v_1 与末速 v_2 之间的差值。速度增加时, Δv 为正,速度减小时 Δv 为负。

(2)由于 Δv 值不大,在 Δv 变化范围内, F_t 值的变化也不大。在计算中,近似地取速度间隔 Δv 内单位合力的平均值来计算。显然, Δv 取得越小,计算误差就越小,但计算工作量增大。

(3)根据列车运行方程求出与 Δv 速度间隔相对应的增量 Δt 和 Δs 。由式(2.2-35)~式(2.2-37)可得

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{120c_p} \quad (2.2-49)$$

$$\text{或} \quad \Delta t = \frac{\Delta v}{2c_p} \quad (2.2-50)$$

$$\text{或} \quad \Delta v = \frac{30\Delta v}{c_p} \quad (2.2-51)$$

$$c_p = \frac{c_2 + c_1}{2}$$

式中: Δt 为每个速度间隔 Δv 内的运行时间,对应式(2.2-49)~式(2.2-51),其单位分别为h、min和s; Δv 为速度间隔,km/h; c_p 为在 Δv 间隔内的单位合力的平均值,N/kN; c_2 为末速度 v_2 时的单位合力,N/kN; c_1 为初速度 v_1 时的单位合力,N/kN。

由于 Δv 的数值不大,在 Δv 速度间隔内的速度可用它的平均值 v_p 来代替。因此运行距离的增量 Δs 为

$$\Delta s = \frac{1000}{60} v_p \Delta t \quad (2.2-52)$$

若时间增量 Δt 的单位为min,则将式(2.2-50)代入式(2.2-52),得

$$\begin{aligned} \Delta s &= \frac{1000}{60} v_p \frac{\Delta v}{2c_p} = \frac{1000}{60} \times \frac{v_2 + v_1}{2} \times \frac{v_2 - v_1}{2c_p} \\ &= \frac{4.17(v_2^2 - v_1^2)}{c_p} \end{aligned}$$

一般在短距离计算时采用分析计算法;长距离计算时采用图解法,如垂直线法等。当然,上述计算方法均可通过计算机编程实现。

1.2.5 高速列车牵引计算的特点和方法

高速列车通常的定义是速度达到200km/h及以上的列车。高速列车是客运列车,它必须有足够加速功率和制动功

率,也就是说列车的加速性能和减速性能要好,这是快速列车必要条件,也是高速列车的主要追求目标。所以,除了常速列车的牵引计算内容外,还必须计算列车的起动加速度、制动减速度;而且在设计中预先选择功率时,除了克服列车最高运行速度下的阻力外,还必须有一定的功率(牵引力)裕量,用于提高列车的加速能力。根据有关资料,满足高速列车的设计条件有以下3个:

- 1) 在最高速度时仍有剩余加速度为 0.03m/s^2 。
- 2) 牵引功率按1.1倍最高速度下的均衡功率选择。
- 3) 在4‰的上坡道上列车能达到均衡速度。

举例说明动车组的起动加速度:

“中原之星” $a=0.4\text{m/s}^2$ ($0\sim 100\text{km/h}$)。

“先锋”号 $a=0.44\text{m/s}^2$ ($0\sim 100\text{km/h}$)。

“中华之星” $a=0.45\text{m/s}^2$ ($0\sim 110\text{km/h}$)。

1.2.6 能耗计算

电力机车牵引的区段电能消耗量是指机车和动车组自出段开始至完成牵引任务后入段为止的总耗电量。它不包括供电系统的电能消耗。计算公式如下

$$Q = Q_y + Q_0 + Q_c$$

式中: Q 为电力机车区段耗电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; Q_y 为牵引运行耗电量, kWh ; Q_0 为惰行、制动及停站自用电量, kWh ; Q_c 为机车出入段及途中调车作业耗电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

电能消耗量可按电流计算,也可按单位时间耗电量计算。按电流计算的基本依据是列车运行速度曲线 $v=f(s)$ 、时间曲线 $t=f(s)$ 和有功电流曲线 $I_p=f(s)$ 。

1.2.6.1 牵引运行耗电量(按电流)

$$Q_y = \frac{U_w \sum [(I_p + I'_{p0})] \Delta t}{60 \times 10^3} \quad (2.2-53)$$

式中: U_w 为受电处电网电压, V ; I_p 为时间间隔内的平均有功电流, A ; I'_{p0} 为自用电有功电流, A ; Δt 为相应工况的时间间隔, min 。

1.2.6.2 牵引运行耗电量(按单位时间耗电量)

$$Q_y = \sum (q_y \Delta t) \quad (2.2-54)$$

式中: q_y 为核定工况(级位和速度)下的单位时间耗电量, kWh/min 。

1.2.6.3 惰行、制动及停站自用电量(按电流)

$$Q_0 = \frac{U_w I'_{p0} \sum \Delta t}{60 \times 10^3} \quad (2.2-55)$$

式中: I'_{p0} 为自用电有功电流, A 。

1.2.6.4 惰行、制动及停站自用电量(按单位时间耗电量)

$$Q_0 = \sum (q_0 \Delta t) \quad (2.2-56)$$

式中: q_0 为惰行、制动及停站的单位时间耗电量, kWh/min 。

1.2.6.5 机车出入段及途中调车作业耗电量

根据统计资料确定,一般不考虑工况,仅按时间计算。

1.2.6.6 单位耗电量

电力机车在某区段 L 完成牵引质量 m 的单位耗电量为

$$q = \frac{Q \times 10^4}{GL} \quad (2.2-57)$$

式中: q 为单位耗电量, $\text{kW}\cdot\text{h}/(10^4\text{t}\cdot\text{km})$; Q 为区段耗电量, kWh ; G 为牵引质量, t ; L 为牵引区段长度, km 。

2 牵引电气系统构成

轨道交通牵引电气系统是指在钢轨上由电力推动的运输

系统总成。按电能获得的方法不同,轨道交通牵引电气系统可以分类如下:

(1) 电力机车、电动车组、城轨列车和工矿机车是通过电网受流器获得电能的,通称电力牵引系统,也称外给式轨道牵引系统。

(2) 内燃机车和内燃动车组等由车载柴油发电机获得电能的,通称内燃电力牵引系统,也称自给式轨道牵引系统。

(3) 磁浮列车由地面电站供给安放在轨道上的定子(或转子)绕组电源使车载转子(或定子)获得动能,即由直线电动机推进列车运行的,通称磁浮电力系统。

2.1 电力机车

2.1.1 特点

电力机车和电动车组是从接触网获得电能,用牵引电动机驱动轨道交通工具。它们具有如下技术特点:

(1) 可广泛利用多种一次能源,如热力、水力、核能、太阳能,只要有相应的发电站,便可利用相应的能量。

(2) 功率大。由于在电力机车和动车上没有产生能量的原动机,也没有燃料储备,因而在同样的机车质量下,其功率要比自给式机车大。机车单位质量所具有的功率称为机车的比功率,这是衡量机车技术水平的一个标志。目前电力机车的比功率一般达到 $40\sim 60\text{kW/t}$ 。

(3) 速度高。目前,一般客运电力机车运行速度已达 $160\sim 200\text{km/h}$,货运电力机车也达到 $120\sim 140\text{km/h}$,高速电动车组运行速度达到 $300\sim 350\text{km/h}$ 。

(4) 效率高。电力机车的效率为 $80\%\sim 85\%$ 。

(5) 过载能力强。机车在起动、牵引重载列车和通过困难区段时,或者高速动车组在起动加速阶段时,具有大过载能力是十分重要的。电力牵引过载能力仅受牵引电动机的限制,而牵引电动机的过载能力是较高的。

(6) 运输成本低。电力机车和动车组检修工作量小,维修周期长。由于电力机车运输能力的增加,足以补偿电气化初期投资,因此铁道电气化的长远经济效益好。

(7) 司机劳动条件、环保好。以电能为动力,不排废气,不污染环境;同时可将接触网电能供给列车用电,不需要柴油发电车。

(8) 不受外界条件限制,在山区和高寒地区电力机车功率发挥更好。

2.1.2 分类

2.1.2.1 按机车轴数分

(1) 四轴车:轴列式为 B_0-B_0 ,表示2台二轴转向架,单轴驱动。

(2) 六轴车:轴列式 C_0-C_0 或者 $B_0-B_0-B_0$,表示2台三轴转向架或3台二轴转向架。

(3) 八轴车:轴列式 $2(B_0-B_0)$,表示2台四轴机车重联牵引。

(4) 十二轴车:轴式 $2(C_0-C_0)$ 或者 $2(B_0-B_0-B_0)$,表示2台六轴机车重联牵引。

2.1.2.2 按用途分

(1) 客运电力机车:专门用于牵引旅客列车的。

(2) 货运电力机车:专门用于牵引货物列车的。

(3) 客货通用机车:既用于牵引旅客列车,又用于牵引货物列车的。

2.1.2.3 按电流制分类

(1) 直流电力机车:由直流电网供电。我国干线铁路上

没有直流制电力机车，只在工矿机车和城轨车辆上采用。

(2) 交流电力机车：由交流电网供电，其中又分单相低频制（25Hz 或 $16\frac{2}{3}$ Hz）和单相工频制（50Hz）。我国干线铁道电气化供电采用后者。交流电力机车又按电传动方式分为：

- 1) 交—直流传动电力机车：由接触网交流电经牵引变压器降压，再通过变流器变成电压可调节的直（脉）流，供给直（脉）流牵引电动机来驱动机车（或动力车）。
- 2) 交流传动电力机车：由接触网交流电经牵引变压器降压，再通过主变流器变成频率、电压可调节的三相交流电，供给三相交流电动机来驱动的机车（或动力车）。

2.1.3 构成

电力机车主要由机械部分和电气部分组成。机械部分包括车体和转向架。车体一般为箱形结构，端部有司机室，下部为底架，底架两端装有车钩和缓冲装置，用来与车辆或其他机车连接。机车电气和机械设备的绝大部分安装在车体内，一部分安装在车顶上和底架下。牵引电动机、牵引变压器、主变流器、电阻器等所需的通风冷却系统需占相当大的空间，也布置在车体内。

转向架构架通过弹簧悬挂装置向上支承车体，向下支承在轮对上。轮对通过齿轮传动装置接受牵引电动机的转矩，转向架构架向车体底架传递牵引力和制动力。

电气部分一般分为主电路、辅助电路和控制电路（含电子电路），用于电能的传递、变换，控制机车运行。

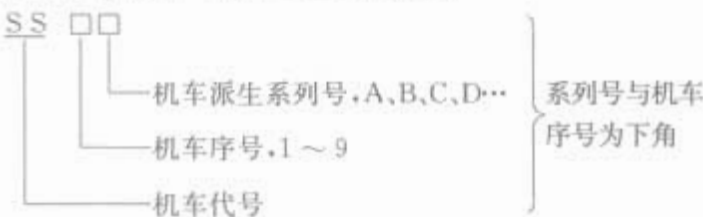
此外，机车还有空气制动系统以及控制电器和辅助设备所需的压缩空气和管道系统。

以上几部分由机车总体设计根据总的技术要求进行综合协调，以实现机车的运用性能。

2.1.4 型号和型谱

2.1.4.1 单相工频供电制

目前为止，我国干线电力机车已经批量生产应用的，以交—直流传动电力机车为主，现在正在实现由交—直流传动到交流传动的转换工程。交—直流传动电力机车，其型号用“韶山”命名，代号为“SS”，全名表示为



和谐型交流传动电力机车，已开始批量生产，其型号代号表示为



2.1.4.2 型谱

机车型谱的主要功能是科学系统地规范系列产品的基本型与发展型的品种、基本参数和结构特性；指导系列产品的发展方向，避免重复开发，建立优化产品的基础，并为用户选型提供依据。

型谱的制定依照国家产业政策和铁路主要技术政策，国内电力机车技术发展趋势、关键技术水平、铁路中长远发展规划和市场需求等而定。

货运电力机车通过牵引计算，以单轴 800kW 电动机为

主，取不同的轴数，按一定的功率裕量（牵引力系数为 0.9），平直道最大速度的剩余加速度为 0.005m/s^2 ，满足我国铁路运输分级需求，遵照标准化、系列化的要求而制定的型谱见表 2.2-1。

表 2.2-1 直传动货运电力车型谱

机车功率 (kW)	轴列式	轴重 (t)	电动机悬 挂方式	最高运行 速度 (km/h)	恒功速度 范围 (km/h)	推荐机型
4800	C ₀ —C ₀	23/25	抱轴悬挂	90	50～80	SS _{6B}
4800	B ₀ —B ₀ —B ₀	23/25	抱轴悬挂	90	44～80	SS ₇ /SS _{7C}
6400	2 (B ₀ —B ₀)	23/25	抱轴悬挂	90	50～80	SS _{4B} / SS _{4C}

客运电力机车按客运列车速度分为 120km/h、140km/h、160km/h 档次，交—直流客运机车的单轴功率最大为 900kW，制定的型谱见表 2.2-2。

表 2.2-2 直传动客运电力车型谱

机车 功率 (kW)	轴列式	轴重 (t)	电动机悬 挂方式	最高运 行速度 (km/h)	最高设 计速度 (km/h)	恒功速 度范围 (km/h)	推荐 机型
3600	B ₀ —B ₀	≤22	抱轴悬挂	120	130	75～120	
3600	B ₀ —B ₀	≤22	全悬挂	140	150	90～140	
3600	B ₀ —B ₀	≤22	全悬挂	160	170	85～160	SS ₈
4800	B ₀ —B ₀ —B ₀	≤22	抱轴悬挂	120	130	75～120	SS _{7C}
4800	C ₀ —C ₀	≤22	全悬挂	160	170	100～160	SS ₉
4800	B ₀ —B ₀ —B ₀	≤22	全悬挂	160	170	90～160	SS _{7D}

目前批量应用的交流传动电力机车有 2 (B₀—B₀) 轴式，功率达到 9600kW，以及 C₀—C₀ 轴式，功率 7200kW。

2.1.5 主要技术参数和牵引特性

2.1.5.1 主要技术参数

(1) 额定功率 (P_N)。即机车功率，系指持续工况下电力机车的额定功率，是各牵引电动机轴输出功率的总和。在直流或脉流牵引电动机的情况下

$$P_N = N \frac{U_N I_{aN}}{1000} \eta_t \tag{2.2-58}$$

式中： P_N 为机车额定功率，kW； N 为牵引电动机台数； U_N 为牵引电动机额定端电压，V； I_{aN} 为牵引电动机额定电压时满磁场下的电枢电流，A； η_t 为牵引电动机的持续工况下的效率（不包括齿轮传动装置的效率）。

(2) 轮周牵引力 (F)。各牵引电动机作为电动机运行时通过轮轨间相互作用在动轮轮周上的纵向力总和。

(3) 持续牵引力 (F_N)。机车持续工况下归算到机车轮周上的牵引力。

(4) 起动牵引力 (F_q)。机车起动时速度为 0～5km/h 内最大轮周牵引力的平均值（轮径半磨耗）。该值决定了机车在困难坡道上坡停、起动牵引能力。

(5) 电制动力 (B)。由列车驱动牵引电动机作发电机运行时作用在动轮轮周上的纵向电制动力总和。

(6) 电制动额定功率 (P_{BN})。在持续工况下机车电气制动的功率（归算到动轮轮径半磨耗）。

表 2.2-3

国产电力机车主

参数	SS ₁ (221 号始)	SS ₂	SS ₃	SS _{3B}	SS ₄	SS _{4G} /SS _{4C}	SS _{4B}	SS ₅
用途	客货	客货	客货	客货	货	货	货	客
轴式	C ₀ —C ₀	C ₀ —C ₀	C ₀ —C ₀	C ₀ —C ₀	2 (B ₀ —B ₀)	2 (B ₀ —B ₀)	2 (B ₀ —B ₀)	B ₀ —B ₀
轴重 (t)	23	23	23	23	23	23/25	23	21.5
持续功率 (kW)	3780	4620	4350	4350	6400	6400	6400	3200
持续速度 (km/h)	43	51.5	48	48	51.5	51.5	50	80
最高速度 (km/h)	90	100	100	100	100	100	100	140
持续牵引力 (kN)	301.1	303.4	317.5	317.5	437	437	450	137
起动牵引力 (kN)	487.4	530	490	490	628	628	628	235
变流器	单拍全波整流桥	一段整流桥	双拍整流桥	不等分三段半控桥	四段经济半控桥	不等分三段半控桥	不等分三段半控桥	一段全控桥加一段半控桥
功率因数补偿						有	有	有
调压方式	低压侧有级调压	高压侧有级调压	级间相控调压	相控调压	相控调压	相控调压	相控调压	相控调压
控制方式	33 个恒压级	33 恒压级	8 级级间调压	恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒流、准恒速
电制动方式	一级电阻	一级电阻	二级电阻	加馈电阻	二级电阻	加馈电阻	加馈电阻	再生
制动功率 (kW)	3500	3107	3956	3956	5570	4000	5300	2500
牵引电动机悬挂方式	抱轴悬挂	抱轴悬挂	抱轴悬挂	抱轴悬挂	抱轴悬挂	抱轴悬挂	抱轴悬挂	全悬挂 (电动机空心轴)
车体底架长度 (mm)	19400	20000	20200	20200	15200 (单节)	15200 (单节)	15200 (单节)	15500
车体宽度 (mm)	3106	3107	3100	3100	3100	3100	3100	3100
落弓后机车高度 (mm)	4740	4750	4740	4740	4775	4775	4775	4677
固定轴距 (mm)	4600	4670	4300	4300	3000	2900	2900	2900
转向架中心距 (mm)	10400	10600	11200	11200	8200 (单节)	8200 (单节)	8200 (单节)	15500
车钩中心距 (mm)	20368	21336	21416	21416	2×16416	2×16416	2×16416	16716
车钩水平中心线距轨面高 (mm)	880	880	880	880	880	880	880	880
首台出厂年份	1980	1969	1978	1992	1985	1993/1997	1995	1990
研制单位 ^①	株机厂株洲所	株机厂株洲所	株机厂株洲所	株机厂株洲所	株机厂株洲所	株机厂株洲所	株机厂株洲所	株机厂株洲所
至 1999 年产量/台	826	1	677	577	158	415/2	29	2

① 研制单位分别为株洲电力机车厂（简称株机厂）、株洲电力机车研究所（简称株洲所）、大同电力机车厂（简称大同厂）、西门子公司和阿尔斯通公司。

要技术参数表

SS ₀	SS _{6B}	SS ₇ /SS _{7B}	SS _{7C}	SS _{7D}	SS ₈	SS ₉	AC4000	DJ ₂ (奥星)	HXD1/HXD2
客货	客货	客货/货	客	客	客	客	客	客货	货
C ₀ —C ₀	C ₀ —C ₀	B ₀ —B ₀ —B ₀	B ₀ —B ₀ —B ₀	B ₀ —B ₀ —B ₀	B ₀ —B ₀	C ₀ —C ₀	C ₀ —C ₀	B ₀ —B ₀	2 (B ₀ —B ₀)
23	23	23/25	22	21	22	21	23	21	23/25
4800	4800	4800	4800	4800	3600	4800	4000	4800	9600
48	50	44	76	96	100	99	60	74	70/65
100	100	100	120	170	170	170	120	220	120
351	337.5	385	220	171	126	169	242	206	700/760
485	485	485	310	245	210	286	325	264	494/532
两段半控桥	不等分三段半控桥	一段全控桥加一段半控桥	一段全控桥加一段半控桥	不等分三段半控桥	不等分三段半控桥	不等分三段半控桥	交—直—交	交—直—交	交—直—交
有	有	有	有	—	—	—	—	—	—
相控调压	相控调压	相控调压	相控调压	相控调压	相控调压	相控调压	调频调压	调频调压	调频调压
恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒流、准恒速	恒力矩起动、恒功率运行	恒力矩起动、恒功率运行	恒力矩起动、恒功率运行
二级电阻	加馈电阻	再生	再生	加馈电阻	加馈电阻	加馈电阻	再生	再生	再生
3619	4029	4000	4000	4000	2600	4070	3200	4400	9600
半悬挂	半悬挂	半悬挂	半悬挂	全悬挂 (轮对空心轴)	全悬挂 (轮对空心轴)	全悬挂 (轮对空心轴)	半悬挂	全悬挂 (轮对空心轴)	全悬挂 (轮对空心轴)
20200	20200	20800	20800	20800	16300	21000	17800	18124	
3100	3100	3105	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100
4700	4754	4700	4700	4700	4628	4754	4760	4640	4600
4300	4300	2880	2880	2880	2900	2150	2900	2900	2900
11200	11200	14200	14200	14200	9000	11570	10500	10300	
21416	21416	22016	22016	22016	17516	22216	19016	19000	
880	880	880	880	880	880	880	880	880	880
1991	1992	1992/1997	1998	1999	1996	1998	1996	2001	2006
株机厂 株洲所	株机厂 株洲所	大同厂 株洲所	大同厂 株洲所	大同厂 株洲所	株机厂 株洲所	株机厂 株洲所	株机厂 株洲所	株机厂 株洲所	株机厂、西 门子/大同厂、 阿尔斯通
53	30	89/4	15	2	160	2	1	2	

(7) 最大电制动力 (B_{max})。电制动时发电状态的牵引电动机允许的最大负荷,并在制动电气设备允许情况下能发挥出的最大电制动力(归算到动轮轮径半磨耗)。

(8) 持续速度 (v_N)。机车持续工况下的运行速度。

(9) 最高速度 (v_{max})。机车正常运行允许的最高速度。它受到机车运行稳定性和机械强度等因素的限制。

(10) 恒功速度比 (v_{pmax}/v_N)。机车以恒功率运行时最大速度与其持续速度之比,表明机车在此范围内为恒功运行。

(11) 起动平均加速度 (a)。机车从零起动至一定速度(一般取持续速度)时间内的平均速度变化率。这是衡量客运机车加速能力的重要技术指标。

(12) 剩余加速度 (a_s)。列车在 v_{max} 时,机车具有的牵引力与列车在平直道上的阻力之差使列车能产生的加速度称为剩余加速度。它是决定客运机车功率并保证客运列车在平直道上能较快达到 v_{max} 的重要衡量标志,一般为 $0.01 \sim 0.02m/s^2$,高速客运列车可取 $0.03m/s^2$ 。

(13) 机车总质量 (m)。系指机车整备质量,它是机车自身质量、乘务员的质量和机车工作所需的各项质量(2/3箱砂子、必需工具、润滑油等)之和。

(14) 轴重 (W)。静止的机车整备状态下,一个轮对作用于平直轨道上的总垂向力。客货运电力机车、电动车组、高速电动车组均有不同的规定值。

(15) 黏着因数 (μ)。在动轮与钢轨接触处切向力与法向力之比最大值,用百分数或小数表示。对于牵引和制动工况及不同的轨面状态,此因数是不同的。

(16) (有功)效率 (η)。电力机车(有功)效率指机车动轮轮周输出功率与牵引变压器网侧输入有功功率之比。

(17) 功率因数 (λ)。电力机车网侧输入有功功率与视在功率之比。

(18) 等效干扰电流 (J_p)。指由于电力机车网侧电流的畸变,在电网中产生的谐波电流对铁路沿线通信带来的干扰经权重换算后的等效干扰电流值。

(19) 电力机车耗电量 (Q)。是指电力机车牵引运行耗电量 (Q_t),惰行、制动及停站自用电量 (Q_b),出入段及途中调车作业耗电量 (Q_c) 三者的总和。

国产电力机车主要技术参数见表 2.2-3。

2.1.5.2 牵引特性

电力机车牵引特性是机车轮周总牵引力 F 与机车速度 v 之间的关系,即 $F=f(v)$ 。机车牵引特性曲线 $F=f(v)$ 的限界,一般由机车黏着极限、恒功限制、换向限制和最高速度限制的包络线组成。在机车牵引特性限界之内为机车正常牵引运行的范围。现以 SS_{4B} 型电力机车牵引特性曲线为例,见图 2.2-3。

首先利用式 (2.2-59) 和式 (2.2-60) 分别求出机车持续点的速度 v_N 和持续牵引力 F_N ,即

$$v_N = \frac{60\pi D}{1000\mu_c} n_N \tag{2.2-59}$$

式中: v_N 为机车持续点速度, km/h; D 为机车轮径(半磨耗时), 1.2m; μ_c 为传动比; n_N 为牵引电动机额定转速, r/min。

$$F_N = \frac{2N\mu_c\eta}{D} M_N \tag{2.2-60}$$

式中: N 为机车牵引电动机台数; η 为齿轮传动效率; M_N 为牵引电动机额定转矩, kN·m。图 2.2-3 中 $v_N=50km/h$,

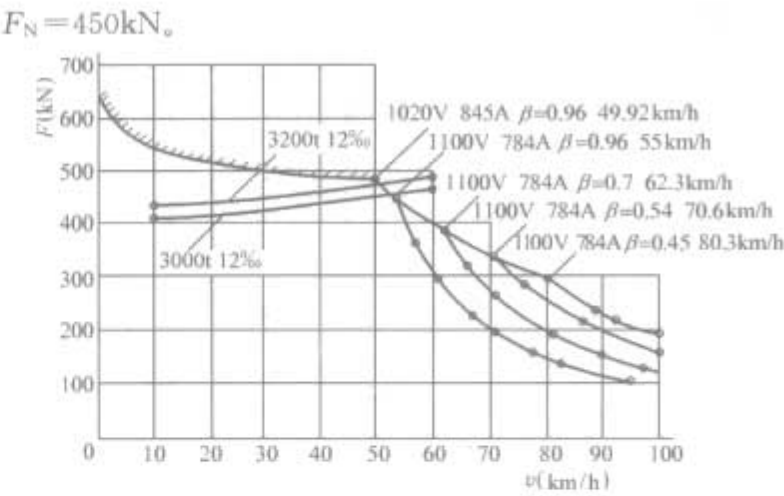


图 2.2-3 SS_{4B} 型电力机车牵引特性曲线

(1) 机车黏着限制。货运电力机车黏着牵引力 F_p 的表达式为

$$F_p = m \left(0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \right) \times 9.81 \text{ (kN)} \tag{2.2-61}$$

式中: v 为机车速度, km/h; m 为机车整备质量, t。

对应图 2.2-3 中 0~50km/h 带小斜影线的曲线段。

对于货运电力机车,为了在此速度范围内有利于发挥黏着牵引力,往往从机车的最大起动牵引力至额定持续速度点的牵引直接连线作为机车黏着限制。而对于客运机车,其起动牵引力要低于或大大低于机车的黏着限制。

(2) 恒功限制。电力机车的恒功率限制可按式计算

$$F = \frac{3.6NU_N I_{aN} \eta_i \eta_e}{v} \times 10^{-3} \text{ (kN)} \tag{2.2-62}$$

式中: U_N 为牵引电动机额定电压, V; I_{aN} 为牵引电动机额定电流, A。

图 2.2-3 中 50~80km/h 速度范围内是 $F=f(v)$ 的恒功段。

必须指出,在恒功段运行时,存在恒压线运行、超压线运行、磁场削弱运行三种工况。这三种工况下的 $F=f(v)$ 特性曲线,可按牵引电动机持续电压(1020V)下固定磁场削弱($\beta=0.96$)时,超压级电压(1100V)下固定磁场削弱($\beta=0.96$)和一、二级磁场削弱($\beta=0.7, 0.54$)时的速率特性 $n=f(I_a)$ 和转矩特性 $M=f(I_a)$ 各组数据,再利用 $v = \frac{60\pi D}{1000\mu_c} n$ 和 $F = \frac{2N\mu_c\eta}{D} M$ 两关系式求得。图 2.2-3 中只画出在超压级、固定磁场及磁场削弱时 $F=f(v)$ 特性曲线。

(3) 换向限制。仍按牵引电动机超压级电压下最小磁场削弱($\beta=0.45$)时的速率特性 $n=f(I_a)$ 和 $M=f(I_a)$ 的数据,利用 $v = \frac{60\pi D}{1000\mu_c} M$ 两关系式求得,即图 2.2-3 中 80~100km/h 速度范围内超压级 1100V、 $\beta=0.45$ 的 $F=f(v)$ 的曲线。

(4) 最高速度限制。SS_{4B} 型机车牵引时, $v = v_{max} = 100km/h$ 。

以上仅叙述了机车牵引特性限制线,连同在机车牵引特性范围内,对机车进行特性控制(即恒流准恒速控制)、牵引无级调速,均由电子或微机控制来完成,这属于现代交直传动相控电力机车牵引特性的控制方法。

图 2.2-3 中还绘出了 2 条列车阻力曲线,分别为牵引 3200t、坡道为 12‰和牵引 3000t、坡道为 12‰的阻力曲线。

2.1.5.3 电制动特性

电力机车电制动(即动力制动)特性是机车的轮周总制

动力 B 和机车速度 v 之间的关系, 即 $B=f(v)$ 。电力机车电制动基本上分为电阻制动(含加馈制动)和再生制动两类。

(1) 电阻制动(含加馈制动)特性。电阻制动是牵引电动机作发电机运行, 将列车运行中的机械能(动能、势能)转变为电能, 消耗在电阻上, 最终成为热能散发到大气中去的制动方式。电阻制动特性 $B=f(v)$ 的界限, 一般由最大制动力限制、最大励磁限制、恒功限制、换向限制和最高速度限制曲线组成。在这个界限内为机车正常制动运行的范围。SS_{4B}型电力机车制动特性如图 2.2-4 所示, 图中 OB-CDEF 为机车电阻制动特性范围。

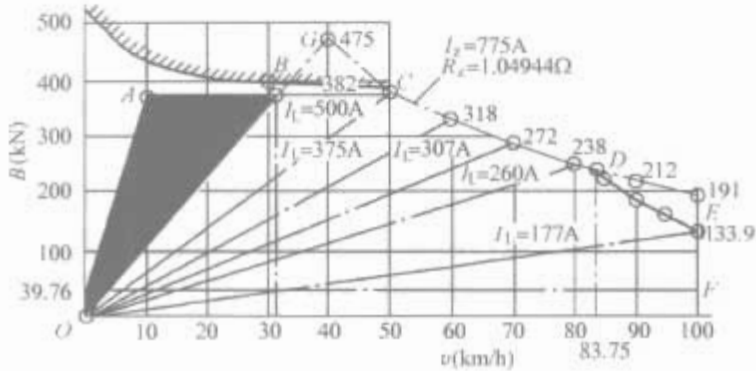


图 2.2-4 SS_{4B}型电力机车制动特性曲线

1) 最大制动力限制。最大制动力 B 限制应不超过机车制动黏着限制 $B_{\mu}=0.8F_{\mu}$ (式中 0.8 为经验取值), 并符合设计要求。即图 2.2-4 中 BC 线段, 为 382kN, 将电阻制动自然特性削峰。

2) 最大励磁限制。指牵引电动机最大励磁电流 I_{Lmax} 时 $B=f(v)$ 曲线的表达式为

$$B=k_1\Phi_{max}^2v \tag{2.2-63}$$

式中: Φ_{max} 为牵引电动机最大励磁磁通, Wb; k_1 为制动力常数。 k_1 由牵引电动机、制动电路电阻、齿轮传动等有关参数决定, 即图 2.2-4 中的 OG 斜线。

3) 恒功限制。指最大制动电流时 $B=f(v)$ 曲线的表达式为

$$B=K_2I_{max}^2/v \tag{2.2-64}$$

式中: I_{max} 为牵引电动机最大制动电流, A; K_2 为制动力常数。 $B=f(v)$ 曲线即图 2.2-4 中的 GD 线。

4) 换向限制。指机车的接近最大速度 v_{max} 电制动时, 受牵引电动机换向的限制, $B=f(v)$ 曲线的表达式为

$$B\leq K_3e_{max}^2/v^3 \tag{2.2-65}$$

式中: e_{max} 为牵引电动机最大换向电抗电动势, 是决定因素; K_3 为制动力常数, 它与牵引电动机、制动电路电阻、传动比等参数有关。图 2.2-4 中的 DE 线即换向限制曲线。

5) 最高速度限制。与机车牵引时相同, 即图 2.2-4 中的 EF 线。

电阻制动可分一级和二级电阻制动。对应每一级制动电阻值有一个尖峰形的自然电阻制动特性(如图 2.2-4 中的 OGDE 线), 即由最大励磁时的斜线和最大制动电流时的双曲线构成。二级电阻制动有两个尖峰形的自然电阻制动特性, 其低速制动性能好, 但特性不连续。

加馈制动是电阻制动的特例, 发生在机车低速制动最大励磁仍不能维持制动力要求时, 通过对晶闸管整流装置调节整流电压来补足发电机电势的减小, 以保证牵引电动机最大制动电流, 从而保持机车最大恒制动力(参见图 2.2-4 中阴影部分 OAB)。加馈制动实际上可以保持机车制停, 即当

机车速度为 0 时仍能保持最大制动力。但在实际操作中, 当机车在 10km/h 速度以下时, 常辅以空气制动使列车停稳, 无需再保持最大制动力而按斜线下降。加馈制动的优点是低速制动特性连续, 缺点是需要消耗电网电能。

图 2.2-4 中 OABCDEF 为 SS_{4B} 型电力机车加馈电阻制动特性限制范围。

(2) 再生制动。再生制动是将牵引电动机作发电机运行, 将列车运行中的机械能(动能、势能)转变成电能送回接触网, 供给区段内机车用电, 或经牵引变电所回送到一次侧电力系统中去。与电阻制动一样, 再生制动时, 牵引电动机均处于他励发电机状态, 其电枢绕组必须与逆变状态工作的全控整流桥串联连接才能实现。

再生制动特性的包络线的外形与加馈电阻制动特性类同, 由最大制动力限制、恒功限制、换向限制、最高速度限制和 10km/h 速度内的下降斜线组成, 可参见图 2.2-5 SS₇ 型电力机车再生制动特性曲线。在这个包络线运行区内最高速度 v_{max} (100km/h) 到中间速度范围为调磁场区, 在中间速度至 0km/h 速度范围内为调相角区。

1) 最大制动力限制。再生制动最大制动力限制应不超过机车制动黏着限制, 并符合设计要求。在 SS₇ 型电力机车制动特性曲线中的最大制动力限制值(在 10~45km/h 内)为 320kN。

2) 恒功限制。其制动力 $B=f(v)$ 曲线的表达式为

$$B=(K_4I_{ZN}^2+K_5I_{ZN}^2)/v \tag{2.2-66}$$

式中: I_{ZN} 为牵引电动机额定制动电流, A; K_4 、 K_5 为制动力常数。 K_4 、 K_5 除了与牵引电动机、制动电路电阻和传动比参数等有关之外, 还与牵引变压器二次电压、再生逆变角和移相控制角等参数有关。

在 SS₇ 型电力机车制动曲线中恒功限制是指 45~80 km/h 之间的曲线。

3) 换向限制。其制动力 $B=f(v)$ 曲线的表达式为

$$B\leq K_6e_{max}^2/v^3+K_7e_{max}/v^2 \tag{2.2-67}$$

式中: K_6 、 K_7 为制动力常数; e_{max} 为牵引电动机最大换向电动势。 K_6 、 K_7 同样与牵引电动机、制动电路电阻和传动比、牵引变压器二次电压、再生逆变角和移相控制角等有关。

在 SS₇ 型电力机车制动曲线中指 80~100km/h 之间的曲线。

4) 最高速度限制。SS₇ 型机车的 $v_{max}=100$ km/h。

以上仅叙述了电力机车电阻制动、加馈制动和再生制动的限制线, 连同在电制动特性的界限范围内, 通过对牵引电动机调节励磁电流和制动电流(及调节半控桥移相角)或调节励磁电流和全控桥的移相角实现机车电阻制动(及加馈制动)或再生制动运行, 进行限流、准恒速控制, 实现现代交一直传动相控电力机车电制动无级调速, 也均由电子或微机控制完成。

再生制动与加馈电阻制动相比: 再生制动适用于电力机车长大坡道重载牵引, 它不但低速性能好, 而且节能, 制动力特性陡, 黏着利用好, 但对交一直相控机车, 因其功率因数低、谐波干扰大、控制系统相对复杂、离线时易“颠覆”过载而受到限制, 而在交流传动机车和电动车组上能保持较高功率因数, 低谐波干扰, 更广泛采用; 加馈制动低速性能好, 但耗电大, 制动力特性欠陡, 黏着利用较差, 但系统简单可靠, 在干线客运交直相控机车上广泛采用。

2.1.6 新型机车的研制

(1) 交一直传动电力机车技术升级。为使它们有更高的质量、水平和档次,必须多方面加强研究和创新,尤其要依托电力电子和信息技术进步,进一步提高机车的可靠性水平。

(2) 交流传动电力机车的研制。自主开发新型交流传动2001年研制了2台“奥星”电力机车为代表,轮周功率1200kW,采用GTO水冷式主变流器的交直交传动系统;以“奥星”派生出耐寒型机车,于2004年出口哈萨克斯坦3台,后续订2台。通过技贸结合,转让先进技术后进行国产化、掌握了先进的交流传动电力机车技术,能够批量生产,已形成和谐型电力机车系列。

(3) 新型电力机车的关键技术。新型电力机车研制紧跟世界先进水平,研究高性能的交一直一交传动系统,同时应用现代高新技术,提高电力机车整体设计、工艺水平,研发出多种国产的新型电力机车,其关键电气技术应包括:

1) 高速转向架技术。设计性能良好的全悬挂转向架,开发无摇枕转向架及径向转向架,合理选择一系、二系悬挂参数。

2) 车体技术。研究车体轻量化结构,采用高强度结构材料和铝合金材料减小车体质量;采用模块化设计多种车型的研制开发。

3) 牵引变压器技术。研究和开发壳式牵引变压器的电磁设计、轻量化工程设计技术、特殊绝缘结构与材料技术及相关工艺技术。

4) 牵引变流器技术。研究牵引变流器主电路拓扑结构和工作原理,大功率电力电子器应用技术等。

5) 牵引电机技术。研究和开发异步牵引电机的电磁设计、PWM供电时特殊绝缘结构与材料、高可靠性转子材料等。

6) 网络控制系统。研究列车网络控制的拓扑结构形式、中央控制单元的功能、子系统功能等。

7) 牵引控制技术。研究PWM整流器控制、高性能电机控制、黏着利用控制、故障诊断保护等牵引控制核心技术。

8) 制动技术。制动技术包括制动控制技术、故障诊断技术、防滑控制技术。

2.1.7 典型机车

2.1.7.1 SS_{4B}电力机车

(1) SS_{4B}型电力机车是由2节完全相同的4轴电力机车,通过内重联环节连接组成的8轴重载货运电力机车。每节车为一个完整系统,设有一个司机室。2节车重联处有中间走廊连通,可以很方便地从一节车走到另一节车。SS_{4B}型电力机车还具有外重联控制功能,可以在一个司机室对2台(共16轴)机车进行控制。

(2) 每节车有2台二轴转向架。牵引力传递系统采用中央低位斜拉杆推挽式牵引装置,动力学稳定性好、黏着利用率高。

(3) 采用全叠片式机座的ZD114型牵引电动机及其滚动轴承抱轴式悬挂、单侧刚性直齿传动。

(4) 机车主电路采用独立转向架供电及不等分三段半控桥的整流电路。前者为了实现机车轴重电气补偿,后者使机车在1/2功率以上有较好的功率因数,并使机车实现相控无级调压。为了改善牵引电动机在深度磁场削弱工况时的换向性能,在牵引电路中采用了分流电抗器。为改善机车低速时的电制动性能,机车采用加馈电阻制动。

(5) 采用整流管和晶闸管组成的整流装置。整流装置采用铜散热器,能够改善装置的散热条件和散热片与母线接触

面的抗氧化性能,进一步提高装置可靠性。

(6) 机车主电路中交流侧设有功率因数补偿装置,因而具有较高的机车功率因数和较小的谐波等效干扰电流。

(7) 机车具有超压级和三级磁场削弱控制功能,以增加机车恒功调速范围。

(8) 机车采用相控电力机车通用的特性控制技术。

(9) 机车采用微机控制,大大提高了控制精度和一致性,并能实现机车技术数据信息的传输、显示和存储,给机车故障诊断和处理提供了极大方便。

(10) 机车装有防空转、防滑行装置。

(11) 机车辅助电路采用传统劈相机系统。每节设2台劈相机。各辅机采用三相自动开关进行保护。

(12) 全车导线99%采用冷压接头,尤其是控制电路导线采用冷压型线簧式插接件作为各屏柜、各装置之间的快速连接器,保证了电路的可靠性。

(13) 车体为整体承载结构,用高强度低合金钢焊制而成,并采用有限元分析法进行优化设计,整体结构能满足规定应力的要求。同时,由于采用整体的预布线、预布管的先进工艺,方便施工,缩短周期,为提高组装质量创造了条件。

(14) 采用传统的车体侧面大面积百叶窗通风冷却方式和滤尘效果、滤尘量都较理想的过滤材料,保证了全车通风要求和滤尘效果。整流装置与牵引电动机是串联通风方式,经过对风道的优化设计,完全满足整流装置的风速要求和牵引电动机换向室的静压要求。

(15) 机车采用DK-1型电空制动机,并具有空电联合制动性能。

其牵引制动特性见图2.2-3和图2.2-4。

2.1.7.2 SS₇型电力机车

SS₇型电力机车采用B₀-B₀-B₀转向架、复励牵引电动机和再生制动三大创新技术,特别适用于山区小曲率半径线路,减小机车轮缘磨耗,提高机车牵引能力。根据运输需要,不断开发新产品,目前形成了SS₇型系列机车。从SS_{7C}以后开发了客运电力机车。其技术特点如下:

(1) 采用3B₀转向架,导向轮侧向轨道作用力下降30%~60%,作用于构架的横向力减小30%,因而可以减少机车轮缘磨耗。

(2) 主电路采用一段全控桥加一段半控桥的相控调压电路,其中全控桥可以实现再生制动功能,是交直传动国产机车中唯一实用的再生制动机车。

(3) 复励、全叠片、6极ZD111型牵引电动机,电动机特性差异很小。

(4) 具有机车功率因数补偿装置,兼作3次滤波器,功率因数较高,谐波含量小。

(5) 壳式JDFP-7700/25型牵引变压器(内含6台平波电抗器,4台功补电抗器和1台电流互感器)。

(6) 变流装置采用KP1400-26型晶闸管、ZP2200-26型二极管、铜叠片散热器,强迫风冷却。

(7) 采用标准电子控制装置,具有牵引复励控制、再生制动、特性控制、黏着特性限制、恒功限压、轴重转移电气补偿、防空转/防滑行和机车重联控制等功能。

(8) 劈相机和电子保护辅助系统。

(9) 车体采用柜架式整体承载结构。

其牵引/制动特性见图2.2-5,SS_{7D}的牵引/制动特性见图2.2-6。

2.1.7.3 SS₈型电力机车

SS₈型电力机车是我国首先投入大批量生产的客运机

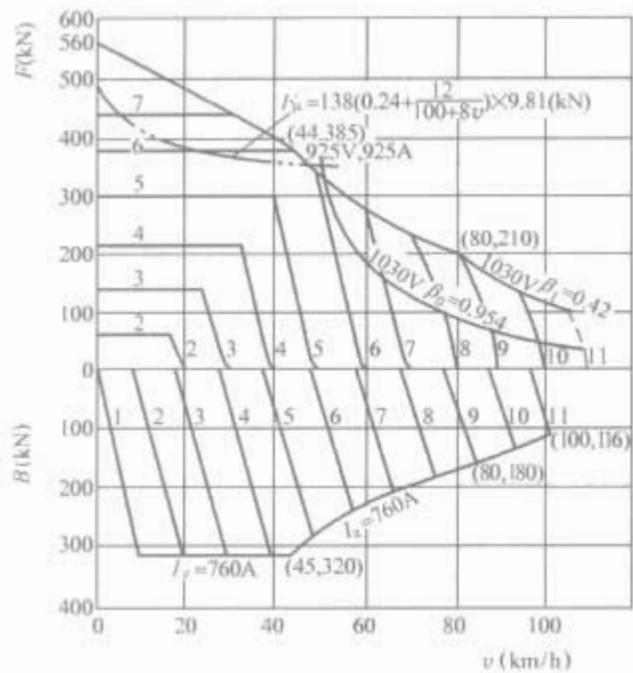


图 2.2-5 SS₇/SS_{7B} 型电力机车牵引/制动特性

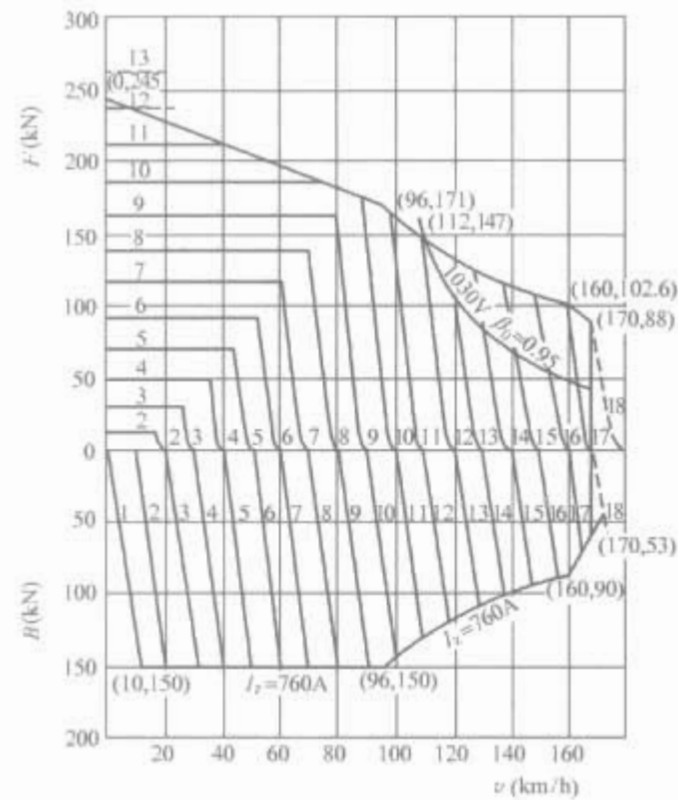


图 2.2-6 SS_{7D} 型电力机车牵引/制动特性

车, 适用于铁路干线牵引提速的旅客列车。

该机车采用 B_0-B_0 轴式, 轴重 22t。它吸收了 SS₃ 型客运电力机车的技术改进而成的机车, 持续功率提高到 3600kW, 最高速度达 170km/h。

SS₃ 型机车主要技术特点如下:

(1) 采用交一直、串励电动机的传动形式; 三段不等分半控整流桥调压和晶闸管分路的无级磁场削弱控制; 加馈电阻制动方式。

(2) 采用转向架独立供电方式, 实现前后 2 个转向架的轴重转移的电气补偿, 以充分利用黏着作用。

(3) B_0 轴式的转向架, 采用轮对空心轴、六连杆驱动装置, 牵引电动机为转向架架承式悬挂, 低牵引拉杆, 牵引点高度为 220mm, 具有良好的黏着性能和动力学性能。

(4) 采用微机控制、诊断、显示系统, 具有初步的智能控制功能; 实现牵引和制动的特性控制; 空转/滑行保护; 空电联合制动。

(5) 牵引电动机为全叠片结构, 双 H 级绝缘, 持续功率 900kW。

- (6) 机车上设置列车供电柜代替列车发电车。
 - (7) 劈相机辅助系统。
 - (8) 车体为整体承载结构。
- 其牵引/制动特性见图 2.2-7。

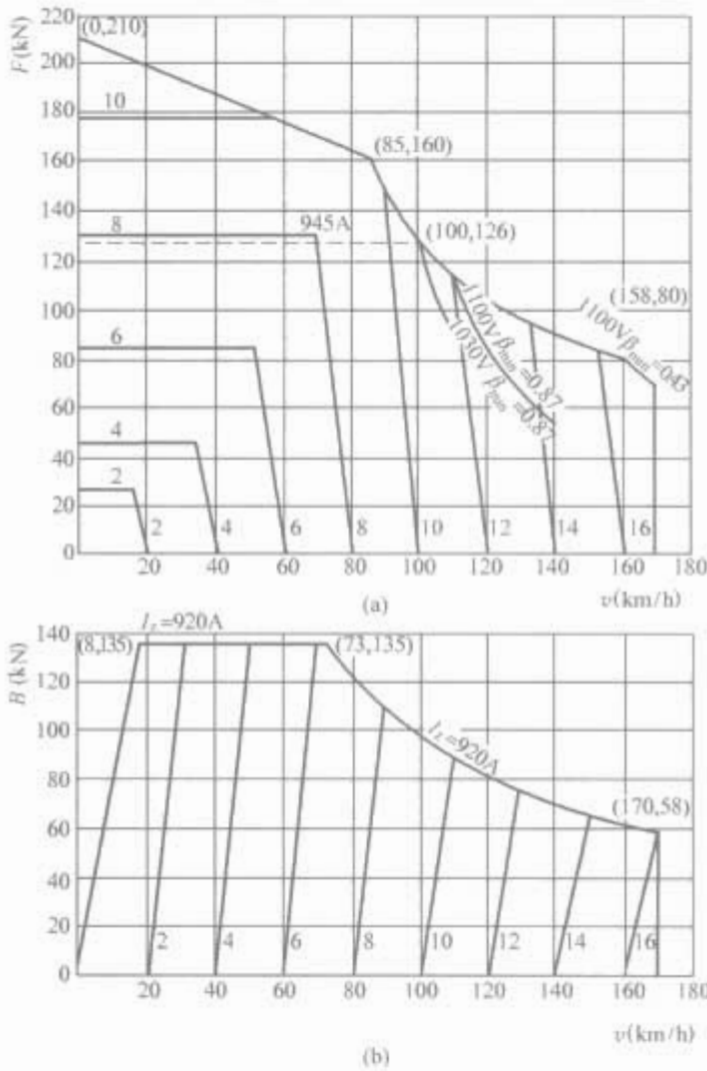


图 2.2-7 SS₃ 型电力机车牵引/制动特性
(a) 牵引特性; (b) 制动特性

2.1.7.4 SS₃ 型电力机车

SS₃ 型电力机车是 SS₁ 型机车的派生系列产品, 即主电路的形式及其设备参数基本上是相同或者相似的, 它们之间的主要区别在于转向架轴式的变化, 由二轴转向架变成三轴转向架, 机车持续功率从 3600kW 提高至 4800kW, 适用于干线铁路牵引 160km/h 快速旅客列车, 其牵引功率的裕量大, 克服了 SS₁ 型机车上大坡道时容易空转的缺点, 更能满足长大坡道区段牵引大编组客运列车的需要。

SS₃ 型电力机车的主要技术特点如下:

(1) 采用交一直、串励电动机的传动形式, 三段不等分半控制整流桥整流调压和晶闸管分路进行无级磁场削弱控制, 加馈电阻制动方式。

(2) 采用转向架独立供电方式, 实现前后 2 个转向架的轴重转移的电气补偿, 以充分利用黏着作用。

(3) C_0 轴式的转向架, 采用轮对空心轴、六连杆驱动装置, 牵引电动机为转向架承式悬挂, 具有良好的黏着性能和动力学性能。

(4) 机车采用中间走廊; 采用独立风道通风冷却牵引变压器、主变流器等电气设备。

(5) 采用微机控制、诊断、显示系统; 具有初步的智能控制功能; 实现牵引、制动的特性控制; 空转/滑行保护; 空电联合制动。

(6) 采用电子逻辑控制单元, 取代传统的继电器及控制导线, 提高了控制系统的可靠性, 节省大量布线。

(7) 适应寒冷的环境设计, 环境温度可达 -40℃。

- (8) 牵引变压器采用卧式结构,降低机车重心,提高运行的平稳性。
- (9) 机车上设置列车供电柜代替列车发电车。其牵引/制动特性见图 2.2-8。

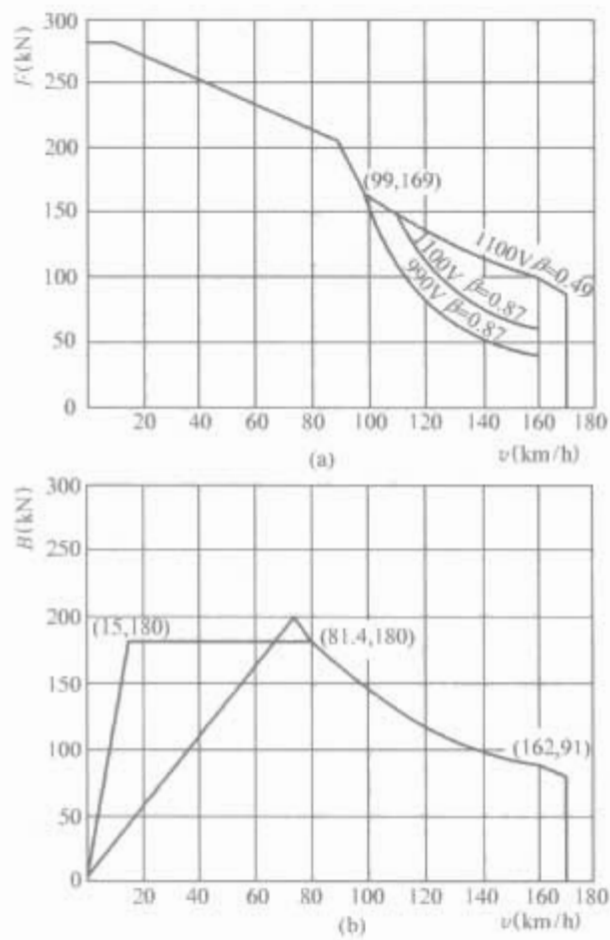


图 2.2-8 SS₄ 型电力机车牵引/制动特性
(a) 牵引特性; (b) 制动特性

2.1.7.5 HXD₁/HXD₂ 型电力机车

HXD₁/HXD₂ 型电力机车为铁路干线用大功率交流传动货运电力机车,它是即将从国外引进的具有先进技术的交流传动机车,并将成为我国未来的主型机车之一。HXD₁ 和 HXD₂ 分别由株洲电力机车有限公司、大同电力机车有限公司生产。

(1) 前者的主要技术特点如下:

- 1) 采用交—直—交异步电动机传动系统,由牵引变压器、主变流器(包括四象限变流器,中间直流环节和逆变器)和异步牵引电动机组成。
- 2) 牵引电动机轴输出功率为 1224kW。
- 3) 主变流器采用水冷式模块结构。
- 4) 采用转向架(2 台电动机并联)控制方式。
- 5) 采用的控制系统均符合 IEC61375—1TCN 标准的 WTB 和 MVB 总线技术;具有牵引系统的逻辑控制;牵引特性计算;变流器控制、保护、故障记录诊断;磁场定向控制;机车黏着控制;多功能车辆总线(MVB)接口及通信;机车重联牵引控制等。

(2) HXD₁ 型与 HXD₃ 型机车不同的技术特点有:

- 1) 在机车总体特点上不同的是,后者是客货通用型,而前者是重载货运机车,因此牵引力、传动比、牵引和制动的恒功率速度范围等均不尽相同。后者牵引的恒功率速度范围为 74~210km/h;而前者牵引恒功率范围为 70~120km/h (23t 轴重)和 65~120km/h (25t 轴重)。
- 2) 主变流器中所采用的开关元件的种类不同,后者是 4500V/3000A 规格的 GTO 元件,而前者是采用更为先进的 3300V/1200A 规格的 IGBT 元件,因此主变流器的技术水平更高。

3) 主变流器中间直流环节的电压值不同。后者是 DC 2700V,而前者是 DC 1800V,这是开关元件电压所决定的原因。

4) 前者的主变流器和辅助变流器在结构上是一体化的,辅助变流器的输入电压直接取自主变流器的中间直流环节,所以牵引变压器只有列车照明、采暖等用的辅助绕组,设备结构更简化。

5) 前者的主变流器具有库内移车的控制功能和辅助变流器控制功能。

HXD₁ 的牵引特性如图 2.2-9 所示。

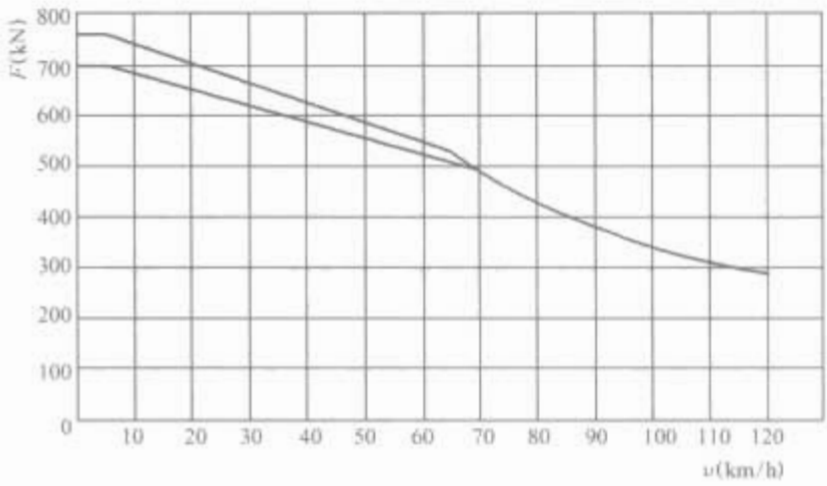


图 2.2-9 HXD₁ 的牵引特性曲线

2.1.7.6 HXD₃ 型交流传动电力机车

HXD₃型交流传动电力机车是根据大连机车车辆有限公司、日本东芝公司与铁道部签署的大功率交流传动电力机车采购和技术引进项目研制的,机车以大连机车车辆有限公司研制的 SSJ₃ 型交流传动电力机车和日本东芝公司生产的 EH500 型电力机车为技术平台,以在中国国内主干线上进行大型货运牵引为目的进行设计研发。

HXD₃ 型交流传动技术特点如下:

- (1) 恒功率速度范围宽。恒功率速度范围 65~120km/h (25t 轴重), 70~120km/h (23t 轴重);持续功率 7200kW,持续制动速度 70km/h (23t 轴重), 65km/h (25t 轴重),最高速度 120km/h。
- (2) 机车采用轴控技术,轴式为 C₀—C₀,机车总重 138t (23t 轴重), 150t (25t 轴重),轴重 23t+2t。
- (3) 电传动系统为交—直—交传动,额定供电电压 25kV,单相交流 50Hz。中间电压 2800V,采用 IGBT 水冷变流机组,1250kW 大转矩异步牵引电动机。
- (4) 起动(持续)牵引力大。起动牵引力 520kN (23t 轴重), 570kN (25t 轴重);持续牵引力(半磨耗轮) 370kN (23t 轴重), 400kN (25t 轴重)。
- (5) 电制动方式采用再生制动。电制动功率 7200kW (70~120km/h) (23t 轴重), 7200kW (65~120km/h) (25t 轴重),最大电制动力 370kN (15~70km/h) (23t 轴重), 400kN (15~65km/h) (25t 轴重)。
- (6) 机车采用 PWM 矢量控制等最新技术,黏着性能好,功率因数高,效率高,能源消耗低,维护量少。功率因数(10%及以上额定功率时) ≥ 0.98 ,机车总效率 ≥ 0.85 (额定网压下,在牵引工况发挥持续功率时)。
- (7) 采用微机网络控制系统,实现了逻辑控制、自诊断功能,而且实现了机车的网络重联功能。

(8) 机车牵引特性为恒牵引力、准恒速特性控制[见图 2.2-10 (a)] 机车制动特性为恒制动力、准恒速特性控制[见图 2.2-10 (b)]。

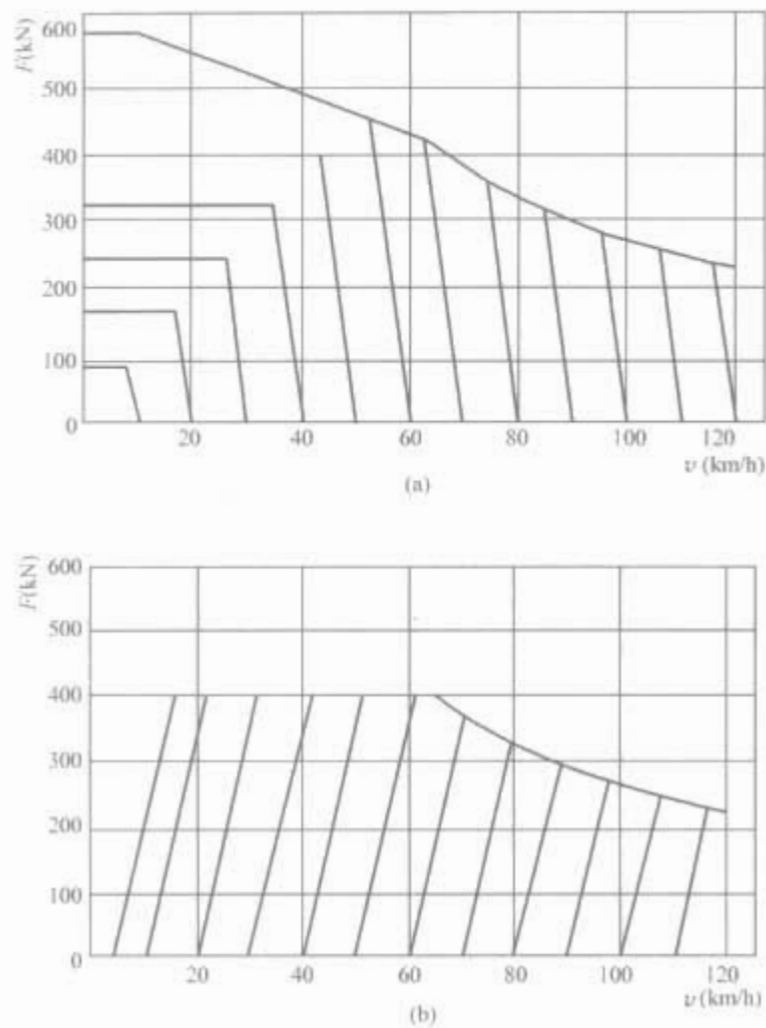


图 2.2-10 HXD3 型电力机车牵引/制动特性
(a) 牵引特性控制曲线 (25t 轴重);
(b) 制动特性控制曲线 (25t 轴重)

2.2 电动车组

电动车组与电力机车在电气系统构成上是相同的，都是通过电网接触线、受流器（受电弓或第三轨受电靴）获得电能，经过变流器的变换功能输电给牵引电动机，再经过机械传动装置传递到轮对、轨道，形成牵引力。唯一与机车不同的是牵引动力（主传动电气系统）的多单元性，即后者牵引动力集中在机车上，前者牵引动力在多个牵引单元上，也就是说，电动车组由 1 个或多个牵引单元并由一个司机室控制全列车的全部牵引单元的运行状态。

2.2.1 分类

2.2.1.1 按编组形式分

(1) 动力分散式电动车组。可以由全动车或多牵引单元组成，每个牵引单元由动车和拖车组成，但动车组两端必须设置带司机室的车辆。所有主要动力设备（除电子控制、显示等系统外）都安装在车底。

(2) 动力集中式电动车组。由两端动力车和中间拖车组成，或由一端动力车和拖车及另一端带司机室的拖车组成。

2.2.1.2 按用途分

(1) 近郊通勤车。用于大城市城郊人口密度大，站间距离短、起动频繁、加速快，通常与市内地铁线衔接，运行速度为 80~120km/h。

(2) 城际电动车组。用于城市间中等距离客运，速度较高（快速客运），一般为 120~160km/h 或更高。

(3) 高速电动车组。用于城市间专线高速客运，运行速度一般为 200~300km/h，正在向 350km/h 发展。高速电动车组也称高速列车。

2.2.2 主要特点

(1) 机动性。多牵引单元的编组运营决定了它的机动性，可以根据客流量、季节性进行调控。

(2) 快速性。动力分散电动车组，动轴数多，虽然单轴功率不大，然而总功率及比功率大，黏着利用系数留有较大裕量，不易空转，滑行，因此起动加速度大，并且动力制动的总功率也大，制动减速度也大。通常高速列车的最大起动、制动的加减速速度达到 1.0m/s² 左右。

(3) 舒适性。动车组以动力和客室为一体化设计，采用具有良好动力学性能的转向架，密接式车钩以及牵引制动力分散的作用，保证了列车的运行平稳性；宽大的旅客空间和配备完善的旅客信息服务系统，使旅客享受到高舒适性水平服务。

(4) 经济性。可以实现高密度发车，运量大；起停时间短，终点折返不解编；多牵引单元即使部分故障也可维持运行；消耗能源少，每千米人均能耗分别是汽车、飞机的 1/7~1/2 和 1/10~1/5，因此经济性好。

(5) 环境污染小。粉尘、油烟、废气排放大大低于汽车，噪声大大低于飞机，高级客运专线列车还装备了封闭污物箱（真空集便器），对环境污染小。

(6) 动车组的日常运行及维修，以不解编和快速换件维修为特点。

2.2.3 主电路结构

如上所述，不论是动力分散电动车组还是动力集中电动车组，它们的主电路结构是以一个牵引单元为独立电源，都是从 AC25kV 侧的电网、受流器输入电源，即几个牵引单元就有几个相同而独立主电路系统，当一旦某个牵引单元出现故障时，在运行中（或动车段上）是可以切除故障单元继续维持运行的，尤其是动力分散式。这是电动车组的优点之一。以“中原之星”电动车组为例，主电路结构如图 2.2-11 所示。图中电网电源经装在变压器拖车（T1-车）受电弓 AP、主断路器 QF01 进入牵引变压器 TM1，然后通过高压电缆输入到两侧的动车（M1、Mc1）主变流器 CB 变换成 VVVF 的电源，输送给 4 台并联的牵引电动机 M1~M4。这样的主电路牵引单元共计有 4 个。而对于“中华之星”集中式电动车组，牵引装备则集中在两端的 2 个动力车上。

2.2.4 典型的电动车组（按出厂时间先后）

2.2.4.1 “春城”号电动车组

春城号电动车组为动力分散式，由 3 动 3 拖，组成 3 个牵引单元（后扩编成 4 动 5 拖），其编组形式为 Tc+M+T+M+M+Tc。该动车组用于干线电气化铁路，昆明—石林之间的旅游列车，最高速度 120km/h，持续速度 75km/h。该动车组采用交—直流传动、多段相控桥主电路，单轴功率为 150kW，可以按 1.2U_N、1.5I_N 过载、过电压起动，最大起动加速度达 0.33m/s²。设有多单元微机通信、诊断、显示系统；微机控制；辅助逆变器供电的异步机辅助系统；塞拉门、轴温报警装置、车顶单元式空调装置，真空集污装置和闭路电视播放系统，具有较高的舒适度。该电动车组是 1999 年昆明世界园艺博览会的配套项目，也是我国第一列投入商业运用的动力分散式电动车组，开创了我国客运列车新的牵引模式。

2.2.4.2 “大白鲨”号电动车组

“大白鲨”号电动车组为动力集中式，由 1 动 6 拖组成，其编组形式为 Mc+5T+Tc，动力车命名为 DDJ1（三字母分别表示：动力车、直流传动和集中式），于 1999 年 4 月研制，是我国最早达到运行速度 200km/h 的客运列车组。该

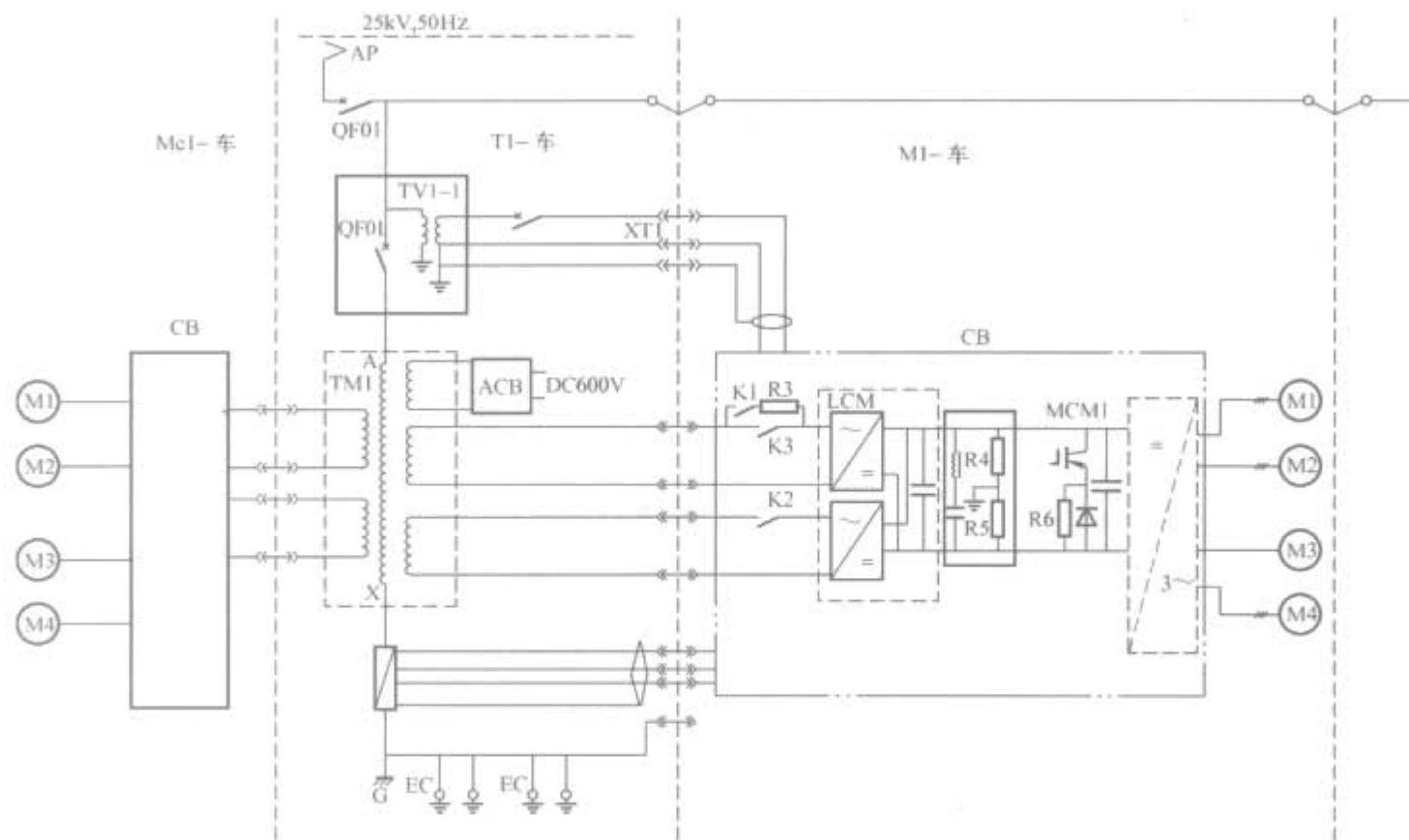


图 2.2-11 “中原之星”动车组的主电路结构示意图

动车组采用交—直—传动，不等分三段桥相控主电路，总牵引功率 4000kW，采用双侧六连杆轮对空心轴弹性传动，微机逻辑控制单元，加馈电阻制动和辅助逆变电源的辅机系统。该动力车经过各种部件的减重措施，实现了轴重 21t 的指标。

该动车组是我国高速列车实用化的初步尝试。

2.2.4.3 “先锋”号电动车组（命名为 DJF2）

“先锋”号电动车组是“九五”国家重点攻关项目，于 2000 年 5 月出厂。经过全面的型式试验项目合格后投入试运行考核。除 IGBT 主变流器是进口外，其余新技术装备均为国产，是我国首列采用交流传动技术、动力分散式的高速电动车组。

DJF2 主要技术特点如下：

(1) 动力分散。全列编组为 Mc+Tp+M+M+Tp+Mc，其中 Tp 为带牵引变压器的拖车，Mc 为带司机室的控制动车，M 为动车，2 动 1 拖为一个牵引单元，共计 2 个牵引单元。

(2) 交—直—交传动方式，IGBT 主变流器（进口）采用三电平式、矢量控制交流传动方式，输出给 4 台并联的单轴额定功率为 300kW 的交流异步电动机。牵引总功率和电制动功率均为 4800kW。

(3) 设计运营速度 200km/h，试验速度 250km/h，在秦沈线创造了试验速度 292.4km/h 的纪录，平均起动加速度 0.44m/s²。

(4) 采用再生制动、直通式电空制动和空气制动的联合制动方式，以再生制动为优先。

(5) 列车的牵引、制动、辅助系统，车厢的设备控制和监视系统，列车安全防护设备、显示系统等通过列车通信网络有机地连接到列车控制、监视和诊断系统。

2.2.4.4 “中原之星”电动车组（命名为 DJF1）

“中原之星”电动车组零、部件均为国产，为我国首列商用交流传动的电动车组。

DJF1 主要技术特点如下：

(1) 动力分散。全列编组为 Mc+Tp+M+M+Tp+Mc，其中 Tp 为带牵引变压器的拖车；Mc 为带司机室的控制动车，2 动 1 拖为一个牵引单元，共计 2 单元 6 节编组，后经扩编改造到 4 单元 14 节编组，额定定员 1392 人。

(2) 交—直—交传动方式，IGBT 主变流器，单轴功率为 200kW 的三相交流异步电动机，列车牵引、再生制动功率 3200kW（扩编后为 6400kW）。

(3) 设计运营速度 160km/h，试验速度 180km/h，牵引平均起动加速度 0.40m/s²。

(4) 采用再生制动和空气制动的联合制动方式，装有电子防滑器。

(5) 列车的牵引和制动运行控制、辅机系统控制，车厢设备控制以及监视安全运行系统等均通过列车总线网络系统联网运行。大部分电气控制功能由列车总线网络来实现（比“先锋”号动车组减少了 100 根以上直通控制线）。

(6) 车顶高压电缆连接 2 台受电弓，正常以单弓运行，改善了弓网的受流特性。

(7) 无摇枕转向架，大挠度空气弹簧，万向齿轮联轴轴的驱动装置，盘形制动等，具有良好的动力学性能。

(8) 鼓形车体断面，轻量化车体结构以及高速流线形的头形及断面。

(9) 高阻抗、轻量化卧式牵引变压器。

(10) 该动车的主电路中间直流环节电压为 1500V，其电传动主要部件与国内地铁动车可以兼容。

(11) 具有自动塞拉门、真空集污装置，闭路电视系统，旅客信息系统。

其牵引、制动特性参见图 2.2-12。

2.2.4.5 “中华之星”电动车组

“中华之星”电动车组是京沈快速客运专线高速列车，动力集中式，最高运营速度为 270km/h。由 2 动 9 拖组成，即 M+9T+M。动力车被命名为 DJJ2 型，其牵引/制动特性见图 2.2-13。

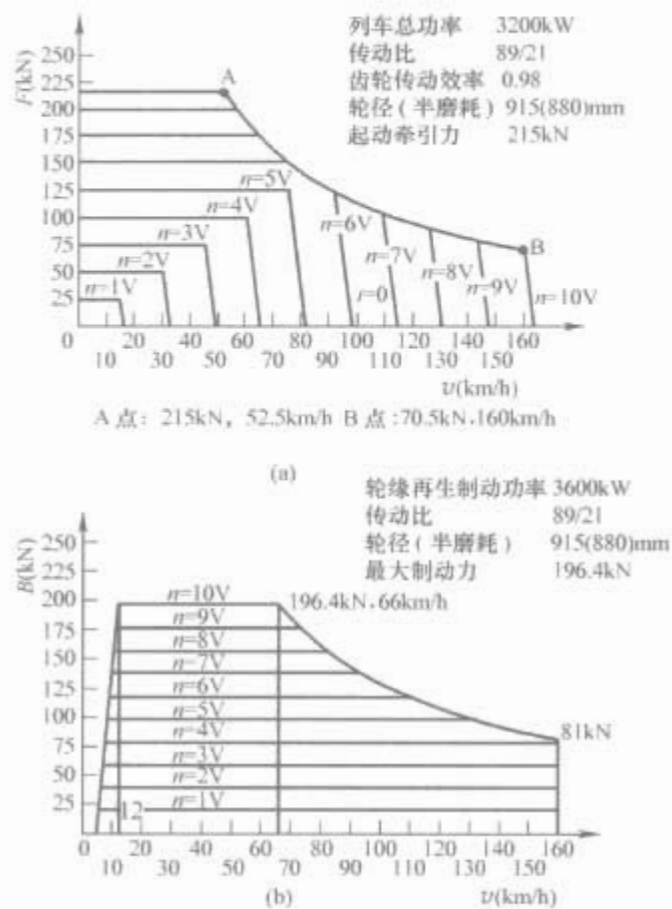


图 2.2-12 “中原之星”动车组牵引特性和再生制动特性

(a) 牵引特性；(b) 再生制动特性

注：图示为半列车（2 个牵引单元）的功率、牵引力、制动力数值。

主要技术特点如下：

- (1) 采用动力集中方式。由两端各一台动力车组成推挽牵引方式，中间 9 节为拖车。
- (2) 车顶高压电缆把两端的车顶高压电路连接，运行中由 1 个受电弓受流；2 台动力车的动力单元是独立的。
- (3) 采用交流传动技术，即由四象限变流器+中间直流环节+三相逆变器组成的水冷 GTO 模块结构的主变流器，单机功率 1225kW 的三相异步牵引电动机的全列轮周牵引功率 9600kW，再生制动功率 8800kW。

表 2.2-4 我国电动车组主要技术参数

参 数	“春城”号 (DZF1)	“大白鲨”号 (DZJ1)	“蓝箭”号 (DJJ1)	“中原之星”号 (DJF1)	“先锋”号 (DJF2)	“中华之星” (DJJ2)	“长白山”号
电传动方式	交一直	交一直	交一直—交	交一直—交	交一直—交	交一直—交	交一直—交
动力车或动车轴重(t)	17	21	20	16	15	19.5	15.5
编 组	3(1M+1T)	1M6T	1M6T	2(2M1T)/8M6T	2(2M1T)	2M9T	3(2M1T)
持续功率(kW)	2160	4000	4800	3200(6400)	4800	9600	6360
持续速度(km/h)	75	127	84	85	200	110	200
最高速度(km/h)	120	210	220	160	250	270	250
起动牵引力(kN)	169.5	180	264	215(430)	168	400	302
变流器	相控	相控	VVVF	VVVF	VVVF	VVVF	VVVF
电制动方式	电阻	电阻	再生	再生	再生	再生	再生
单轴功率(kW)	180	1000	1200	200	300	1200	265
动力布置	分散	集中	集中	分散	分散	集中	分散
列车定员	600	436	421	548(1392)	424	772	666
出厂年份	1999	1999	2000	2001	2001	2002	2002

- (4) 采用车载分布式微机网络系统。通过列车总线 (WTB) 和车辆总线 (MVB) 实行全列车的通信控制、诊断及显示的全部功能，并采用冗余设计，提高全列车的运用可靠性。
- (5) 采用高速的动力和非动力转向架，一、二系弹簧悬挂装置及液压减振器组合，保证高速动力学的良好性能，动力车轴重 19.5t。
- (6) 采用高速双拱流线形头型和轻量化薄壳整体承载车体结构，保证了应有承载性能、轻量化要求。车体断面全列车采用统一的鼓形断面。
- (7) 采用再生制动和空气制动（盘形制动）联合制动方式；全列车装有电子防滑器。

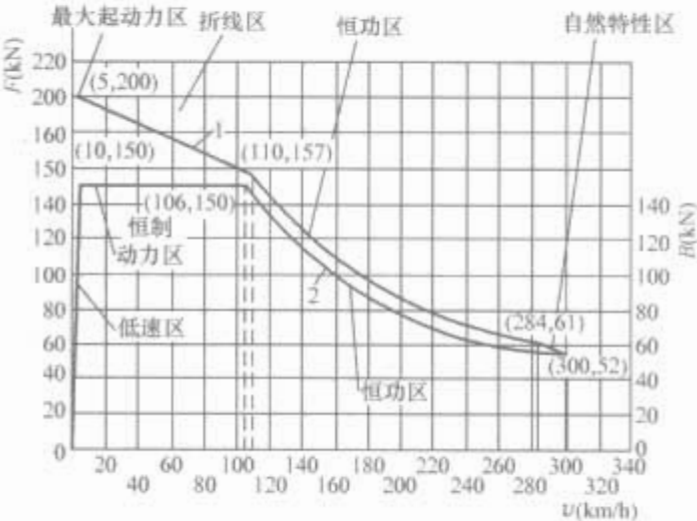


图 2.2-13 “中华之星”电动车组牵引/制动特性

1—牵引特性；2—再生制动特性

- (8) 以转向架为单元的 IGBT 辅助变流器提供了 VVVF 和 CVCf 的 2 组三相辅助电源，辅助电源对辅助机组分类分级供电，系统冗余性强，节能降噪效果好。
- (9) 采用全分裂饼式绕组、高阻抗、下卧式牵引变压器。牵引变压器与滤波电抗器共油箱，轻量化结构。
- (10) 采用车顶夹层通风方式。牵引电动机独立通风，主变流器水冷却器和牵引变压器油冷却器共用通风系统。

2.2.5 国内电动车组主要技术参数

国内开发的几种电动车组主要技术参数见表 2.2-4。

2.2.6 最新高速电动车组

2.2.6.1 CRH₂ 型动车组

CRH₂ 型动车组由四方机车车辆股份有限公司生产，运营速度为 200km/h。CRH₂ 型动车组以日本 E2-1000 系动车组为原型车。

(1) 技术特点：

1) 流线形车头。可降低列车进入隧道或交汇时产生的压力波，同时加强了列车密封，使压力波渗入车内的数值控制在一定水平以下，整车气密指标从 3.9kPa 降至 0.98kPa 的时间大于 50s，高于目前我国标准规定（车内外压力差从 3.6kPa 降至 1.35kPa 的时间大于 18s），降低了乘客的耳膜不适度。

2) 车体。车体结构为轻量化铝合金车体，承载结构采用通常的大型中空铝合金挤压型材组焊成的薄壁筒型整体承载。薄壁铝型材最小壁厚达 1.5mm。车钩为密接式，缓冲器为橡胶缓冲器。

3) 转向架。采用二轴无摇枕转向架，单连杆方式，二系悬挂采用空气弹簧。动车转向架和拖车转向架的主要结构型式基本一致。牵引电机为全悬挂在动车转向架上。车轮采用磨耗形的踏面。

在转向架设计中，着重考虑轻量化和耐腐蚀。动车、拖车的转向架质量分别小于 7.5t、7t，每轴（动车、拖车）的簧下质量小于 2t。

4) 制动系统。采用电气指令式联合制动系统，即动车使用电制动、拖车使用空气制动的联合制动方式。各车辆采用微机控制的制动装置，电制动采用再生制动，空气制动是通过电指令转换成空气指令，让制动缸起制动作用，且制动控制装置内具有滑行检测功能。

采用再生制动并用电气指令式空气制动，可以通过 ATP 完成自动控制及手动制动。4M4T 的编组中，T 车为全机械制动。M 车、T 车的基础制动装置都是采用空电变换的增压气缸和液压盘式装置。

为减少闸瓦磨损，采用延迟控制，首先让动车再生制动负担制动力，减小拖车自身制动力。延迟控制是以 1 辆动车、1 辆拖车为控制单位来进行，并且通过电—空协调控制，实现再生制动与空气制动的切换，当再生制动力不足时由空气制动自动补充。

由于列车随着速度上升，黏着因数会下降，所以设置了随着速度变化而改变制动力的速度—黏着模式控制。该模式是以雨天为前提的黏着试验为基础而设置，所以列车制动时可以保证在规定的距离停车，不致滑行。

5) 牵引传动系统。采用交—直—交牵引传动系统。以 M1 车、M2 车两辆动车作为一个基本单元，每个单元的系统配置相同，包含三大主要部分：牵引变压器、主变流器和牵引电动机。受电弓从 25kV、50Hz 接触网受电，与牵引变压器连接，其二次侧绕组的输出再连接到主变流器、牵引电动机，每台主变流器由四象限变流器+逆变器组成，供给 4 台并联的牵引电动机，实现牵引供电，再生制动时向电网回馈电能。即主电路采用 1 台牵引变压器+2 台主变流器+8 台牵引电动机的模式，电路具有完善的保护功能。

①牵引变压器。采用由牵引变压器+四象限变流器组成的升压式的脉冲整流电路，变压器二次绕组具有高阻抗、弱耦合性。使用带空隙的铁心形式交流电抗器，使主变流器能够稳定运行。二次绕组分为 2 组，每个绕组连接 1 台主变流器。采用壳式无压密封、强迫油循环风冷形式，冷却油为硅

油。牵引变压器的额定参数见表 2.2-5。

表 2.2-5 牵引变压器的额定参数			
参 数	一次侧绕组	牵引绕组	辅助绕组
容量 (kVA)	3060	2570	490
电压 (kV)	25 (17.5~31)	1500	400
电流 (A)	122	857×2	1225
额定种类		连 续	
效 率		0.95	

②主变流器。主变流器由四象限变流器和逆变器组成，其中四象限变流器为单相三电平 PWM 变流器；逆变器为三相三电平 PWM 逆变器。冷却方式为液体沸腾冷却通风方式，冷却介质为氟化碳 (FX3250)。在额定载荷条件下（除辅助电路和控制电路外），逆变器的效率为 0.96 以上。主变流器的主要技术参数见表 2.2-6。

表 2.2-6 主变流器主要技术参数	
参 数	规 格
额定输入容量（变压器参数） (kVA)	1285（单相交流 1500V，857A，50Hz）
中间直流环节额定功率 (kW)	1296（直流 3000V，432A）
逆变器额定输出容量 (kVA)	1475（三相交流 2300V，424A，0~220Hz）
功率因数	0.97 以上（在额定载荷条件下，除辅助电路和控制电路外）
四象限变流器开关频率 (Hz)	1250
逆变器开关频率 (Hz)	500~1000

采用 IGBT 元件主变流器，工作频率可到 1500Hz，单台电动机功率 300kW，所以其牵引系统各部件可以做到体积和质量小、集成化程度更高。总体轻量化水平的进一步提高，使牵引变压器和主变流器可以整合到同一辆车上，即 2 台动车可组成 1 个牵引单元，这样就可以灵活调节动车、拖车的比例。

③牵引电动机。采用三相交流笼型异步牵引电动机。电动机轴承采用不解体就可供油脂的绝缘轴承。强迫通风冷却。该牵引电动机适用于电压源逆变器供电运用方式，具有质量轻、互换性强、转速高等特点。牵引电动机主要技术参数见表 2.2-7。

表 2.2-7 牵引电动机主要技术参数								
分项	功率 (kW)	电压 (V)	电流 (A)	频率 (Hz)	转差 (%)	效率	功率 因数	绝缘种 类 (级)
数值	300 (短时 170%Pn)	2000	106	140	1.4	0.94	0.86	200

6) 辅助供电系统。可分为直接单相交流供电方式和通过辅助逆变器 APU 的三相交流供电方式。由牵引变压器三次绕组 AC400V 单相电直接向空调装置、换气装置及辅助逆变器 APU 供电。而 APU 输出的三相 AC400V，向与牵引系统相关的辅助设备（各风机等）供电。

在 2、6 号车上安装有牵引变压器。辅助绕组输出 AC400V 电压供电给本牵引单元 4 节车辆。设计中考虑了辅

助绕组的输出冗余，当一台牵引变压器故障时，通过切换电路，转换到另一台牵引变压器供电。

在 1、8 号车上安装有辅助电源装置。2 个牵引单元之间辅助电源装置输出相互冗余，设置了切换的扩展供电回路，因此，当 1 台辅助电源装置故障时无需减少负荷。

7) 列车网络控制系统。列车网络控制系统采用 TMS 系统，是由多个 32 位 CPU 控制器（中央装置、终端装置）构成的列车网络系统。该系统通过贯穿列车的总线来传送信息，对运行信息与车载设备的信息集中管理，可有效地实现对司机和乘务员的辅助作用，提高设备保养质量和乘客服务水平。

列车网络控制系统具有如下功能：

①控制指令传送功能。减少了列车贯穿线，提高了列车轻量化、可靠性。

②监视器功能。将列车信息在司机台的显示器上显示，使乘务员了解列车运行状态。

③检查功能。通过车上自动化操作检查，减轻保养工作。

列车信息控制系统控制传输部分为双重系统，具有极高的冗余性，即为不易发生故障的双向环形网络方式。系统具有向左和向右 2 条线路，是一种分散型的系统，即使是 2 处以上的线路发生故障，环形网络断开时，也可以继续进行其他连接着的正常线路之间的传送。另外，还设置有备份传送线，即使在环形网络故障时，还可以使用备份传送线路的控制指令对各设备进行控制。

在两端头车设置中央装置，其余车辆设置车辆控制装置。头车设置的中央装置也为双重系统，确保其可靠性。

(2) 主要技术参数。CRH₂ 型动车组是动力分散型动车组，配置为 4 动 4 拖，2 个动车可组成一个牵引单元。全列车额定定员 610 人。动车组中设有 2 个受电弓。动车组可以单列运行，也可 2 列连挂组成长编组运行。

应该说明的是，CRH₂ 型动车组已形成派生系列，具有 250km/h 和 300km/h 的两种运行速度等级，它们的技术水平和电传动方式、转向架、车体基本结构以及每个动车的功率等级基本一样；唯一不同的是由于运行速度的要求对应的比功率不同，因此动车和拖车数量比例不同了，相应于 250km/h、300km/h 的两种动车与拖车的比例分别为 2：2 和 3：1，后者每个单元的动车和主变流器的数目增加到 3 个。同时受牵引电动机的最高运行转速限制，传动比作相应的变化。

主要技术参数见表 2.2-8。

2.2.6.2 CRH₃ 型高速动车组

CRH₃ 型高速动车组是动力分散型，由唐山机车车辆公司生产，以德国 ICE₃ 和西班牙 AVE S 103 高速动车组为原型。50%为动轴，由 2M2T 组成 1 个牵引单元，每个单元采用交—直—交牵引传动系统，由交流电网输入牵引变压器降压输出到四象限变流器、中间直流环节、逆变器，然后供电给 4 台并联的单轴功率 560kW 异步牵引电动机，组成主电路系统。2 个牵引单元组成编组列车（如 4、8、12 节编组等），最高运行速度 330km/h，最高试验速度 350km/h。

(1) 技术特点：

1) 牵引变压器为卧式，安装在地板下，高度低。考虑到很高的持续功率、热要求以及 25kV、50Hz 电源，进行了

重新设计。采用 50Hz 牵引变压器的铁心，这种变压器安装空间与同等功率的 16 $\frac{2}{3}$ Hz 变压器一样。牵引变压器漏感不考虑网侧滤波器设计，冷却油为酯液。

2) 每一牵引单元由 2 个四象限变流器错开 90°控制供电给中间直流环节。经过变频变压的脉冲逆变器，向动车的 4 个牵引电动机供电。

3) 制动采用再生制动和空气制动。再生制动是常用制动，当电网不能吸收再生制动能量时，能量消耗在电阻上。空气制动是动车用复式车轮制动盘，拖车用车轴制动盘。紧急制动时，再生制动和空气制动一起施加；或当低速时，再生制动力不足，用空气制动来补充。

4) 牵引电动机为 4 极、独立通风、笼型三相交流异步电动机，最大转速为 6000r/min，功率为 560kW。

5) 辅助供电分为 2 个系统，即牵引辅助传动系统和列车加热、空调、照明供电系统，前者由主变流器的中间直流环节供电，后者由牵引变压器辅助绕组直接供电。

6) 列车控制采用 SIBAS32 系统，它是将列车的主要子系统如列车控制、制动、传动、车门、空调等相互连接，构成中央控制和通信网络系统。列车通信网络（TCN）有 WTB（列车总线）和 MVB（多功能车辆总线）2 级。各级有一根总线，一列车的 2 个牵引单元经 WTB 连接。每一牵引单元装了 2 个中央控制单元。诊断系统是单级结构的系统，其主要组成部分是子系统自诊断，上一级车辆和列车诊断、报警系统和视觉装置，差错输入以及诊断数据远程传输和预先通知维修车间。

7) 转向架为 SF500 型，主要组件为模块化结构，转向架构架为双 H 形结构，由 2 根箱形焊接结构侧梁和 2 根横梁相互连接而成，牵引电动机通过横向和旋转弹性的解耦装置装在转向架中。车轮为 G1/40 断面，符合 TSI 互用性要求。

8) 旅客信息系统分为显示系统、旅客娱乐系统以及广播和车辆通信系统。这 3 个单个系统共用操纵和集中控制。

9) 由于我国尚未形成统一的安全系统，因此列车安全系统采用欧洲列车控制系统（ETCS）。

(2) CRH₃ 高速动车组的主要技术参数，可参见表 2.2-8。

表 2.2-8 高速动车组的主要技术参数

参 数	规 格	
动车组型号	CRH ₃	CRH ₂ ^①
电流制(kV, Hz)	25, 50	25, 50
轨距(mm)	1435	1435
编组方式	2(2M2T)	2(2M2T)/2(3M1T)
编组车辆(辆)	8	8
坐席数(个)	600	610
列车总长度(m)	200	约 200
端车长度(mm)	25 835	25 400
拖车长度(mm)	24 775	24 500
车辆外形尺寸(高×宽, mm)	3890×3357	3700×3380
最大轴重(t)	17	14
车轮直径(mm)	920	860
转向架固定轴距(mm)	2500	2500

续表

参 数	规 格	
动车组型号	CRH ₃	CRH ₂ ^①
牵引总功率(kW)	8800	4800/7728
制动总功率(kW)	8000	约为牵引功率的 1.7 倍(短时)
列车起动牵引力(kN)	300	176/235
运行速度(km/h)	300	250/300
最高运行速度(km/h)	330	/300
最高试验速度(km/h)	350	250/350
制动方式	再生 + 盘形 制动联合控制	再生 + 盘形制动联合 控制
牵引方式	动力分散	动力分散
牵引电动机类型	VVVF 异步 电动机	VVVF 异步电动机
辅助电源	中间直流环 节供电系统, 辅助绕组	静止逆变器, 辅助 绕组
车体构造		大型中空铝合金挤压 型材焊接

① CRH₂ 型动车组有 250km/h、300km/h 两种运行速度等级, 后者编组的每个牵引单元为 3MT, 即增加了 1 个动车, 牵引功率增大 50%, 以满足提高运行速度的要求。

2.3 电传动内燃机车

2.3.1 作用和要求

内燃机车是采用内燃机作为动力装置的机车, 铁道机车用的内燃机绝大部分是柴油机, 但是柴油机的转矩—转速特性不符合机车牵引性能的要求, 因此, 在柴油机曲轴到机车动轮之间需要一种传动装置来实现这种要求。一般传动装置分为机械传动, 电传动和液力传动三种方式, 而其中采用柴油机—发电机组、变流器和牵引电动机来实现的机械能—电能—机械能的转换这种方式, 称为电传动方式, 相应的机车就是电传动内燃机车。

内燃机车电传动系统包括主传动系统、辅助传动系统和控制系统。

内燃机车的电传动装置具有以下作用:

- (1) 可使机车牵引力和速度在广阔的范围内平稳变化, 满足列车运行的要求。
- (2) 不但柴油机装车功率可在机车调速的全范围内得到充分利用, 而且柴油机部分工况的装车功率也可精确控制到与柴油经济特性所规定的数值相等, 使内燃机车的经济性大大提高。
- (3) 利用牵引电动机短时过载能力, 使机车具有较大的起动牵引力和优越的起动加速度。
- (4) 方便地实现机车运行方向(前进、后退)和工况(牵引、电阻制动)的转换。
- (5) 传动效率高, 工作可靠, 总体布置灵活方便, 有利于机车系列化。

内燃机车电传动装置的主要技术要求是具有性能良好、工作可靠的柴油机—主发电机组、主变流器(整流+逆变器)、牵引电动机及控制系统。

2.3.2 分类和组成

内燃机车电传动系统分为直流电传动、交—直流电传动和

交流电传动三种类型。

(1) 直流电传动。采用直流牵引发电机和直流串励牵引电动机。我国 DF、DF₂、DF₃ 型以及进口的 ND₁、ND₂ 型等机车属于此类型。

(2) 交—直流电传动。采用三相交流同步发电机经过整流器转换为直流电, 然后供电给数台并联的直流牵引电动机。它能克服直流发电机转速、换向、尺寸的限制, 进一步提高了机车功率, 我国 DF₄~DF₁₂ 型以及进口的 ND₄、ND₅ 型等机车均属于此类型。

(3) 交流电传动。采用交流同步牵引发电机和三相交流牵引电动机。交流传动又可分成 2 种: 一种是交—直—交电传动系统, 由同步牵引发电机、整流器、直流中间环节、逆变器和交流异步牵引电动机组成; 另一种是交—交电传动系统, 由同步牵引发电机、变频器和交流同步牵引电动机组成。后者没有中间直流环节, 同步牵引发电机发出的交流电经过一个或数个变频器后, 供给交流牵引电动机。

2.3.3 新技术发展

内燃机车关键技术如下:

(1) 采用电子喷射技术的单机大功率柴油机, 装车功率达到 4410kW (6000 马力) 以上, 缸径 280mm, 平均有效压力 1.85~2.24MPa, 强化系数 20~24, 采用燃油电子喷射系统和高增压技术, 耗油率在 204~210g/kWh, 污染少。柴油机的曲轴采用新结构、新工艺, 提高零部件可靠性。

(2) 机车径向转向架降低轮轨磨损, 提高通过曲线速度。

(3) 从交—直流传动技术向交流传动技术发展, 20 世纪 90 年代开始逐步采用交流传动技术。

(4) 车载微机技术, 目前国外新型内燃机车几乎都采用微机控制系统, 主要有 SIBAS、MICAS 和 EM2000 等微机控制系统, 而且已发展到 32 位微机, 功能更多、更完善。我国已在 DF₆、DF₁₁、DF_{8B} 型机车上采用了 16 位、32 位微机控制系统。

主要控制功能如下:

- (1) 柴油机电子调速器和电子燃油喷射系统的控制, 可节省油耗和提高精度。
- (2) 柴油机主发电机组的恒功率控制。
- (3) 驱动装置, 特别是交流传动机车上 VVVF 控制, 控制精度高, 可靠性高。
- (4) 辅助系统(冷却水温、冷却风扇)的优化控制。
- (5) 柴油机变频起动, 降低蓄电池起动能耗, 而且提高起动性能; 能优化机车操作、调节机车牵引、制动特性。
- (6) 黏着控制。
- (7) 重联机车无线遥控, 实现多机同步牵引。
- (8) 列车运行监控, 中央调度系统联网的微机系统, 实现列车运行实时指挥。
- (9) 设备故障诊断及信息显示并报警。
- (10) 信息交换、显示, 实现各节车辆之间的信息交换, 从而使整列车的操纵优化。
- (11) 柴油机自负荷试验。

国内在 DF₆、DF_{7D}、DF₁₁、DF₁₂ 型机车上, 已经应用微机实现多功能控制。

2.3.4 主要技术参数

电传动干线货运内燃机车主要技术参数见表 2.2-9; 电传动干线客运内燃机车主要技术参数见表 2.2-10; 电传动调车内燃机车主要技术参数见表 2.2-11。

表 2.2-9 电传动干线货运内燃机车主要技术参数

机车型号	主要研制单位	生产年份	标称功率 (kW)	总体特性参数								
				传动方式	轴 式	轨 距 (mm)	轮 径 (mm)	机车外形尺寸 长×宽×高 (mm×mm×mm)	转向架特性			
									牵引电机 悬挂方式	轴距 (mm)	中心距 (mm)	
DF	大连厂	1958~1973	1050	直流	Co-Co	1435	1050	16 920×3335×4775	轴悬	2×2100	8600	
DF _{4A}	大连厂	1974~1986	1920	交一直	Co-Co	1435	1050	21 100×3309×4755	轴悬	2×1800	1200	
DF _{4B}	大连厂	1984~1998	1990	交一直	Co-Co	1435	1050	21 100×3309×4755	轴悬	2×1800	12 000	
DF _{4C}	大连厂	1985~	2165	交一直	Co-Co	1435	1050	21 100×3309×4755	轴悬	2×1800	1200	
DF _{4D}	大连厂	1996~	2425	交一直	Co-Co	1435	1050	21 100×3309×4755	滚动轴悬	2×1800	12 000	
DF _{4E}	四方厂	1994~1996	1990	交一直	Co-Co	1435	1050	21 100×3309×4725	轴悬	2×1800	12 000	
DF ₆	大连厂	1989~	2425	交一直	Co-Co	1435	1050	21 100×3308×4775	轴悬	2×1800	12 000	
DF _{7D}	二七机厂	1995~	1500	交一直	Co-Co	1435	1050	18 800×3344×4750	轴悬	2×1800	9980	
DF ₈	戚墅堰厂	1984~	2720	交一直	Co-Co	1435	1050	22 000×3288×4736	滚动轴悬	2×1800	12 324	
DF _{8B}	戚墅堰厂	1997~	3100	交一直	Co-Co	1435	1050	22 000×3304×4736	滚动轴悬	2×1800	12 300	
DF _{8B} 3001	大连厂	2000~	3320	交一直	Co-Co	1435	1050	21 100×3105×4755	轴悬	2×1800	12 000	
DF _{4DJ}	大连厂	2000~	2510	交流	Co-Co	1435	1050	21 100×3309×4750	滚动轴悬	2×1800	11 900	
DF _{8CJ}	戚墅堰厂	2002	3460	交流	Co-Co	1435	1050	22 000×3110×4750	滚动轴悬	2×1800		
DF _{8HJ}	资阳厂	2002	3352	交流	Co-Co	1435	1050	22 300×3304×4736	滚动轴悬	2×1800	12 600	

机车型号	总体特性参数				牵 引 特 性					装 载 量			
	通过最小 曲线半径 (m)	黏着质量 (t)	轴重 (t)	车体型式	轮周效率 (%)	最高速度 (km/h)	持续速度 (km/h)	持续牵 引力 (kN)	起动牵 引力 (kN)	燃油 (L)	水 (kg)	机油 (kg)	砂 (kg)
DF	145	126	21	棚式	30.0	100	18.0	190	302	5400	8000	1200	800
DF _{4A}	145	138	23	棚式	32.7	100	21.9	302	414	9000	1200	1200	800
DF _{4B}	145	138	23	棚式	33.4	100	21.6	324	435	9000	1200	1200	800
DF _{4C}	145	138	23	棚式	32.4	100	23.7	312	440	9000	1200	1200	800
DF _{4D}	145	138	23	棚式	35.0	100	24.5	341	480	9000	1200	1200	800
DF _{4E}	145	138	23	棚式		100	22.0	630	850	9000	1200	1200	800
DF ₆	145	138	23	棚式	35.44	100	22.2	360	435	9000	1200	1200	800
DF _{7D}	100	132/138	22/23	棚式	32.4	100	16.0	308	428	5400	1100	850	600
DF ₈	145	138	23	棚式	34.8	100	30.4	314	441	8500	1200	1200	800
DF _{8B}	145	138	23	棚式	32.3	100	31.2	340	180	8500/9000	1200	1200	800
DF _{8B} 3001	145	138/150	23/25	棚式		118	30.6	364	480	9000	1200	1300	800
DF _{4DJ}	145	138	23	棚式		132 (145)	19.95	444	555	9000	1200	1200	400
DF _{8CJ}	145	150	25	棚式		100	31.8	380	560	9000	1200	1200	800
DF _{8HJ}	145	138	23	棚式		120	28.8	410	520/560	9000	1200	1200	800

柴油机主要参数															主发电机、 牵引电动机型号	累计 生产 台数
型 号	功率(kW)		转速 (r/min)	冲程 数	缸数排列	缸径 (mm)	行程 (mm)	气缸 总排 量 (L)	平均 有效 压力 (MPa)	活塞 平均 速度 (m/s)	强化 系数	增压 方式	增压器 型号	燃油消 耗率 (g/kW·h)		
	标定	装车													燃油消耗率	燃油消耗率
10E207J	1320	1320	850	2	10缸单排直列	207	245×2	170.9	0.61	7.2	4.39	非	—	238+7	ZQFR-1350 ZQDR-204	706
16V240ZJA	2650	2430	1100	4	16V50°	240	275	199.0	1.45	10.08	14.62	定压中冷	45GP802	211+7	TQFR-3000 ZQDR-410	812
16V240ZJB	2650	2430	1000	4	16V50°	240	275	199.0	1.60	9.17	14.67	定压中冷	45GP802-1A	210+7	TOFR-3000 ZQDR-410	3738
16V240ZJB	2940	2650	1000	4	16V50°	240	275	199.0	1.77	9.17	16.23	定压中冷	VTC254-13	208+5	TQFR-3000B ZQDR-410C	694
16V240ZJD	3240	2940	1000	4	16V50°	240	275	199.0	1.95	9.17	17.88	定压中冷	VTC254-13	205+7	TQFR-3000E ZD109B	55
16V240ZJB	2650	2×2430	1000	4	16V50°	240	275	199.0	1.60	9.16	14.66	定压中冷	ZN310	210+7	TQFR-3000B ZD109A	2×17
16V240ZJD	3020	2940	1000	4	16V50°	280	275	199.0	1.82	9.17	16.69	定压中冷	VTC254-13	205+7	CECTA32A (JF202) CE752AFC1 (4ZD1081)	4
12V240ZJ6A	2000	1840	1000	4	12V50°	280	275	149.3	1.6	9.17	14.67	脉冲中冷	ZH261-13E		TQFR-3000 ZQDR-410C	214
16V280Z	3680	3310	1000	4	16V50°	280	285	280.8	1.57	9.5	14.92	MPC中冷	32OP-7	210+7	TQFR-3000 ZQDR-410C	141
16V280ZJA	3860	3680	1000	4	16V50°	280	285	280.8	1.65	9.5	15.68	MPC中冷	VTC254-13	208+7	JF204D ZD109C	40
12V280/320ZJ	4040	3820	1000	4	16V50°	240	320	236.5	2.33	10.67	24.86	MPC中冷	VTC254-13P	204+6	JF212 ZD109D	1
16V240ZJD	3240	2940	1000	4	16V50°	240	275	199.0	1.95	9.17	17.88	MPC中冷	VTC254-13	205+6	JF216 ITB2630 (ICBT)	2
16V280/300ZJB	4710	4260	1000	4	16V50°	280	300	295.6	1.91	10.0	19.10		VTC304P	204		
16V280ZJG	4200	4000	1000	4	16V50°	280	285	280.8	1.795	9.5	17.05	MXPC中冷	VTC254-13G	204	JF220 JD120	1

机车型号	总体特性参数				牵引特性					装 载 量			
	通过最小 曲线半径 (m)	黏着质量 (t)	轴重 (t)	车体型式	轮周效率	最高速度 (km/h)	持续速度 (km/h)	持续牵 引力 (kN)	起动牵 引力 (kN)	燃油 (L)	水 (kg)	机油 (kg)	砂 (kg)
DF ₂	80	113	18.8	罩式	31.0%	95.3	9.3	203.0	300.0	4000	600	1000	1000
DF ₅	100	135× (1±3%)	22.5× (1±3%)	罩式		80.0	9.18	315.0	415.0	5000	800	800	800
DF _{5B}	100	135	22.5	罩式		100.0	15.7	317.0	422.0	5700	800	800	800
DF _{4D}	100	138× (1±13%)	23× (1±3%)	罩式		80.0	24.1	347.4	435.0	8000	1200	1200	1200
DF ₇	100	135	22.5	罩式		100.0	12.6	308.0	428.0	5400	1100	700	600
DF _{7B}	100	138	23	罩式	32.7%	100.0	16.0	308.0	428.0	5400	1100	700	600
DF _{7C}	100	135× (1±2%)	22.5× (1±3%)	罩式		100.0	12.6	308.0	428.0	5400	1100	750	600
DF ₁₂	100	138 或 150	23 或 25	罩式		100.0	21.6	324.0	435.0	6200	1200	1200	800
NJ ₁	100	138× (1±3%)	23× (1±3%)	罩式		80.0	9.0	380.0	470.0	6500	800	800	500
DF _{5D}	100	138× (1±3%)	23× (1±3%)	罩式		100.0	10.8	342.6	467.8	5000	800	800	800
DF _{10D}	100	138× (1±3%)	23× (1±3%)	罩式		80.0	17.8	341.7	480.9	5000	800	800	1200
DF _{7E}	100	150(138)	25(23)	罩式		100.0	≤16	≥308	≥450	5400	1100	850	600

2.4 电传动内燃动车组

2.4.1 特点、应用范围和分类

电传动内燃动车组主要应用于非电气化铁路短途客运及城间快运。

(1) 内燃动车组的特点：

- 1) 与公路客运相比，具有载客多、耗能低、舒适安全、快速、少污染等优点。
- 2) 与内燃机车牵引列车相比，具有编组相对固定，检修机客一体化，双端司机室，折返快捷，起动和制动加速度快，达到快运的要求。
- 3) 用于中等运量和非电化区段，设计速度范围在120~220km/h；特大运量和更高速度则要让位于高速电动车组。

(2) 分类：

- 1) 按动力布置方式不同，可以分为动力分散和动力集中两种形式。
 - ①动力分散式。功率等级在 500kW 以下，数台功率较小的发动机分散布置在各节车厢上，组成全列较大的牵引功率。
 - ②动力集中式。功率等级在 500kW 以上，采用推挽式两端机车形式，整列的动力装置、传动系统集中布置在动力车上，采用和依靠先进的微机控制、车总线微机网络系统实现动力装置的同步控制，还具有调节、控制、监测、安全、诊断、记录等功能。

2) 按传动方式不同，内燃动车组可以分为以下 4 种：

- ①机械传动。早期产品功率在 300kW 以下，直接机械传动，效率高，但装置十分复杂。
- ②液力—机械传动。柴油机输出到液力变矩器，然后由机械传动驱动轮对。一般功率在 300kW 以内。

液力传动—内燃动车组是最广泛应用的一种。缺点是液力变矩器效率低，传动功率不大。

③直流电传动。功率比上述两种大得多，效率也高；但装置体积、质量很大，轴重大，制造成本和维修成本较高。

④交流电传动。优点是技术先进，效率高，设备体积质量小，维修费用低。

2.4.2 电气系统构成

内燃动车组牵引单元的电气系统构成与内燃机车不同，

动车组是多牵引单元（典型的是首尾两端有牵引单元），各单元内电气系统是相同的，都由柴油机—发电机组、变流器和牵引电机构成。因此从电气系统构成而言，动车组与机车并不存在差别，而只是牵引单元的组成形式和数量不同：机车是单个独立系统，且容易与客车挂编和解列；而动车组是多牵引单元系统，采用固定编组、各单元同步控制，现代技术多数是采用列车总线微机网络来实现的。所以作为动车组的主电路、辅助电路、控制电路的功能的介绍，可以参阅本章第 4 节。

2.4.3 NZJ₁ 型内燃动车组

该动车组于 1998 年生产，应用于非电气化、干线客运繁忙的沪宁线区段，运量大，命名为新曙光号，NZJ₁ 代号意义是 N 表示内燃，Z 表示直流传动，J 表示动车集中型。

编组方式为 2 动 9 拖，首尾 2 辆为动力车，中间 9 节为双层旅客车辆。最高速度为 180km/h，标称功率为 1980×2kW，传动方式为交—直电传动。主副发电机同轴，分别用于牵引动力系统和列车 600V 系统的供电。控制方式采用微机控制，两端动力车采用重联线和微机网络 2 种方式并存。牵引特性曲线如图 2.2-14 所示。

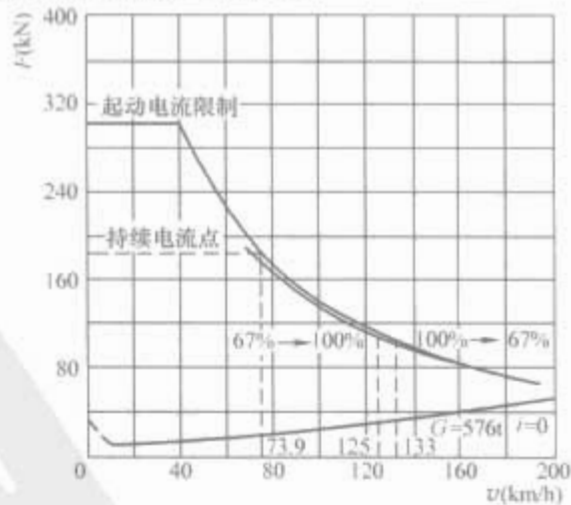


图 2.2-14 NZJ₁ 型动车组牵引特性曲线

2.4.4 NZJ₂ 型内燃动车组

2000 年 7 月，研制 NZJ₂ 型准高速内燃动车组，编组 2M10T，命名为“神州”号动车组。两端为动力车，中间 10 节为双层客车，动车组柴油机总装车功率为 3310kW×2 (2×4500hp)；最高速度为 180km/h，全列车定员为

1410人。
动力车动力装置为16V240ZJE型柴油机，采用电子燃油，最大装车功率3310kW，交一直电传动，带电阻制动装置，牵引特性曲线如图2.2-15所示。

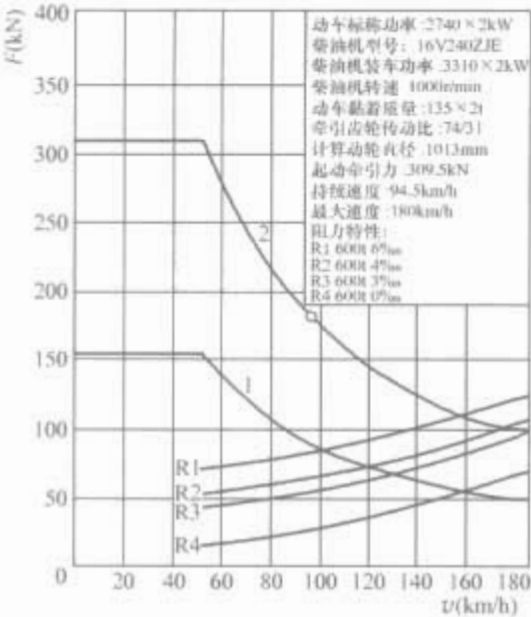


图 2.2-15 NZJ₂ 型内燃动力车牵引特性曲线

1—单节动力车的牵引力；2—动车组2节动力车的牵引力

注：图为每节动力车扣除拖车供电功率300kW时的特性曲线。

动力车采用微机控制，两动力车用网络列车总线的控制系统，具有重联运行、柴油机恒功、空电联合制动、恒压、运行系统参数显示、动力车设备故障记录与报警等功能。其主要参数见表2.2-12。

表 2.2-12 内燃动车组主要技术参数

动车组称号	新曙光号	神州号	金轮号
动车组型号	NZJ ₁	NZJ ₂	NZJ ₃
编组	M+9T+M	M+10T+M	M+11T+M
动力车轴式	Ao1Ao-Ao1Ao	Bo-Bo-Bo	Co-Co
动力车轴重(t)	21	22.5	22.5
动力车总装功率(kW)	2760×2	3310×2	3310×2
标称功率(kW)	1980×2	2740×2	2740×2
持续速度(km/h)	74	98	87
最高速度(km/h)	180	180	160
持续牵引力(kN)	184	184	204
起动牵引力(kN)	301	325	342
柴油机型号	12V280ZJ	16V240ZJE	16V240ZJE

表 2.2-13 各种城市公交系统运送能力、适用范围及投资比较表

城市公交形式	线路结构特征	一般列车编组数	单向客运量(万人次/h)	运行速度(km/h)	乘坐适宜时间(min)	可能达到的距离(km)	估计投资总造价(万美元/km)	一条线建设周期(年)	投资回收期(年)
地下铁道	以地下隧道为主，也可有部分高架或地面	2~8	3~8	35~40	10~30	30	3000~10 000	10~15	20~30
快速轻轨交通	以高架和地面为主，也可有部分地下	1~4	2~4	30~35	20~60	50	1000~1500	3~5	10~15
独轨交通	跨座式或悬挂式全部高架支柱支承	4~6	1~2	30~35	10~30	15	1500~2000	3~5	10~15
公共汽车无轨电车	城市道路	1	0.6~0.8	12~20	10~30	15			

续表

动车组称号	新曙光号	神州号	金轮号
主发电机型号	JF2111	JF214	JF210D
牵引电动机型号	ZD106A	ZD106	ZD106A
动车组总长(m)	281	309	
动车组总重(t)	828	929	
牵引电动悬挂方式	架悬式、轮对空心轴	架悬式、轮对空心轴	架悬式、轮对空心轴
动车车体尺寸(长×宽×高,mm)	20 600×30 104×4736	21 750×3104×4600	20 780×3100×4600
动力转向架固定轴距(mm)	1900	2000	2000
动车组定员(人)	1140	1410	
首列出厂年份(年)	1999	2000	2001

2.4.5 NZJ₃ 型“金轮”号内燃动车组

该动车组于2001年8月投入兰州铁路线路运行。该系列共有4列动车组，编组不同，其中2列为2M8T双层动车组，1列为2M11T单层动车组，1列为2M6T单层动车组。均为首尾动力车，中间挂客车车辆，动力装置为16V240ZJD柴油机，最大运用功率为3310kW。动力车都是单端司机室电传动内燃机车，轴列式为Co-Co，最高速度为160km/h，轴重为22.5t，采用微机网络技术(LongWooks通信协议)，实现重联控制和通信以及传动级控制。此外还采用GPS全球卫星定位系统来确定机车运行中的位置及海拔高度，从而修正柴油机的输出功率。

2.5 城市轨道交通车辆

2.5.1 分类及适用范围

国内外城市快速轨道交通大致有地下铁道、快速轻轨和高架独轨3种形式。对于常规的城市地面交通(公共汽车、无轨电车、有轨电车、小汽车)，由于道路平交，车辆混杂，能耗大，严重空气污染，行驶速度低(大约10~15km/h)，已经越来越不能满足城市客流日益增长的需要，而成为大、中城市中出行的重大问题。为此，提升城市客运的质量和速度是目前当务之急，其唯一有效的途径，是必须发展包括地上、地下和地面的立体现代化公共交通网络，而上述的三种城市快速轨道交通形式必定成为这个交通网中的主通道。它们的适用范围分别是：①地下铁道车辆，适合特大城市，客流量特大的交通主干线，单向流量3万~8万人次/h；②快速轻轨，适用于中等城市繁忙区段，单向流量次之，约2万~4万人次/h；③独轨，适用于城市用地特别紧张的繁华城市，1万~2万人次/h。各种城市公交系统的运送能力、适用范围及投资比较见表2.2-13。

2.5.2 地铁的特点和基本参数

地铁电动车组是人口高度集中的大城市市内大运量的重要交通工具，它有如下特点：

(1) 动力分散式电动车组，多单元组成，每单元可以是全动车，也可由一定的动车、拖车比例组成，一般编组为 4~8 辆。

(2) 载客量大，地铁最大运输能力单向可达 3 万~8 万

人次/h。

(3) 具有较高的起动加速度和制动减速度。地铁站间距离约为 1km，列车起动、制动频繁，必须具有较高加速度和减速度，一般平均起动加速度为 0.8~1.1m/s²，常用制动减速度为 0.9~1.2m/s²。

地铁电动车组的基本技术参数和性能见表 2.2-14。

表 2.2-14 地铁动车组的基本技术参数和性能

车 型	DK3-DK4	DK8-DK16	DK11	CT1	DK20	DKZ2-DKZ3	DKZ4 (DK28~ DK31)	北京地铁 国产化 样车辆 (H454 号)	广州地铁 车辆 1 号 线/2 号 线车辆	上海地铁 2 号线 车辆	上海地铁 3 号线 车辆
编组	全动车	全动车	全动车	4M2T	全动车	3M1T	3M3T	2M2T	4M2T	4M2T	4M2T
自重(t)	34	33.5	33.5	M 车 37 T 车 28	35	M 车 35.8~37.4 T 车 31.5	M 车 32~33.5 T 车 24~27	M 车 35 T 车 30	M 车 38 T 车 34	M 车 38 T 车 34	M _P 车 36; M 车 37.4 T 车 32.8
定员(人)	180	180	180	310	472	370	475	470	310	310	T310/ M313
车辆座席 数(人)	60	60/56	60	50/58	40	40/46	36/46	36/44	56	56	T56/ M48
允许超载 (%)	50	50	50	100	50	70	26.5	27	32	32	32
构造速度 (km/h)	80	80	80	80	80	80	80	80	90	80	90
供电电压 (V)	DC750	DC750	750	DC750	DC750	DC750	DC750	DC750	DC1500	DC1500	DC1500
受流方式	第三轨 上部接触	第三轨 上部接触	第三轨 上部接触	第三轨 上部接触	第三轨 上部接触	第三轨 上部接触	第三轨 上部接触	第三轨 上部接触	顶部受 电弓	顶部受 电弓	顶部受电 弓
转向架形 式	轴式水 平簧/空气 簧	轴式水 平簧/空气 簧	轴式水 平簧/空气 簧	轴式水 平簧/空气 簧	轴式水 平簧/空气 簧	轴式水 平簧/空气 簧	无摇枕， 空气簧	空气弹 簧	轴式人 字金属橡 胶簧/空气 簧	钢板橡 胶簧/空气 簧	螺旋簧/ 辅助橡胶堆 空气簧
传动形式	单级圆 柱斜齿轮	单级圆 柱斜齿轮	单级圆 柱斜齿轮	单级圆 柱斜齿轮	单级圆 柱斜齿轮	单级圆 柱斜齿轮	单级圆 柱斜齿轮	单级圆 柱斜齿轮	单级齿 轮	单级齿 轮	2 级齿轮
牵引电动 机	ZQ-76 直流串励	ZQ-76-4	脉流电 动机	MB-3232 -B 直流串 励	ZQ-86	ZQ-132	笼型异 步交流电 动机	笼型异 步交流电 动机	笼型异 步交流电 动机	笼型异 步交流电 动机	笼型异步 交流电动机
动力车牵 引功率(kW)	74×4	74×4	74×4	130×8	86×4	132×4	180×4	180×4	190×4	190×4	185×4
主电路控 制方式	凸轮变阻	凸轮变阻	斩波调压	斩波调压	凸轮变阻	斩波调阻	VVVF	VVVF	VVVF	VVVF	VVVF
备注	出口朝鲜	天津地铁				出口伊朗	进口逆变器	2005 年	1995 年进口		

2.5.3 快速轻轨车的特点、车型和基本参数

轻轨车 (Light Rail Vehicle, 简称 LRV) 是一种轻型、快速的轨道车辆，使用于城市及近郊的中运量的公共交通工具，它是由老式有轨电车发展而来。

(1) 特点。轻轨车就其运输能力而言，介于地铁车与有轨电车之间，它比有轨电车速度快、载客量大、噪声低、舒适安全；与地铁车相比，它显得更灵活，可以运行在高架桥及地下，也适合于大城市公共交通系统立体化要求。由于运行的道路条件复杂，对紧急制动有更高的要求。轻轨车一般较轻，属轻型轨道车辆；地铁车则属重型轨道车辆。轻轨交通以其造价低、建设周期短、见效快的突出优点受到各国欢迎。近几年，轻轨交通发展迅速，必将促进轻轨车的设备更新，以更新技术装备车辆。

(2) 轻轨车车型分类：

1) 按轴数分。有 4 轴、6 轴单铰接和 8 轴双铰接三种车型：①4 轴车的车身短，可以通过较小的曲线半径，有较大的灵活性，2 个转向架都为动力转向架，黏着重量利用率高，没有铰接装置，结构简单，载客量较少；②6 轴单铰接

车长度利用率比 4 轴好，3 个转向架两端是动力转向架，中间是无动力转向架，黏着重量利用率稍差，两节车体由铰接装置贯通而使乘客分布均匀；③8 轴双铰接车有 4 个转向架，中间 2 个为无动力转向架，黏着重量利用率差，动车性能指标稍差，长度利用率好，乘客分布均匀。

2) 按停靠站台形式分。有高站台和低站台两种车型。低站台车型灵活性好，尤其是在轻轨与汽车、电车线路混交情况下便于设置街道中心站台；但车内要设置 2~3 级踏步，上下车不方便。高站台车型不必设置踏步，上下车方便，可以缩短停车时间；由于车底不必挖踏步缺口，增大了载客面积；另外，车门长度较短，刚度大，不易变形，但需设置专用道。

3) 按车辆编组状况分。有单司机室车、双司机室车、无司机室的中间车和不带动力的拖车。

(3) 规格和主要参数。国内外几种轻轨车主要参数见表 2.2-15。

国内推荐的 4 轴动车、6 轴单铰接式和 8 轴双铰接式轻轨车，其主要技术参数见表 2.2-16。

(4) 轻轨车的选用。可按客流量选择车型，由式 (2.2-68) 估算，即

$$C = \frac{WT}{60} \tag{2.2-68}$$

式中：C 为车辆额定客流量，人；W 为路线的单向客流量，人/h；T 为平均间隔时间，min。

车辆载客量不宜过小，考虑高峰期适当超载（约 40%），各类车型的额定载客量为 4 轴车 140 人，6 轴单铰车 220 人，8 轴双铰车 270 人。

(5) 轻轨车发展趋势：①采用低地板车辆，方便上下车，提高通过能力；②提高车辆牵引性能，广泛采用微机（16 位以上）网络控制、逻辑控制电路，先进的 IGBT 变流器；③提高运行的可靠性、安全性和维修性；④车体从 2.5m 加宽到 3m，以进一步提高载客量。

2.5.4 单轨交通的特点和基本参数

单轨交通是利用城市道路中间上空架设高架轨道梁，开行电动车辆的一种运输方式。

单轨交通具有占地少、承担的运量较大，能在大坡道和小半径曲线区段发挥正常性能、建设工期短、造价低、安全、噪声低、无污染等优点。由于它具有轨道导向的特点，可以采用现代化的通信和信号技术，高频率的发车间隔，从而达到快捷、便利、舒适地运送乘客。单轨车辆在城市交通中可以作为大客流量交通工具（地铁、近郊铁路）的集散手段，用于通勤、观光、旅游、购物等出行目的。对于地形条件复杂、高低相差悬殊而运量相对较小的地段，单轨交通是较理想的选择。目前世界上共有单轨铁路 20 余条，其中日本占 6 条。

单轨交通按结构形式分为跨坐式和悬挂式两种。跨坐式单轨铁路的车辆车体重心在轨道梁上方，运行时车体跨坐在轨道梁上（见图 2.2-16）；悬挂式单轨铁路的车体重心在轨道梁下方（见图 2.2-17），转向架悬挂着车体沿轨道梁运行（见图 2.2-18）。

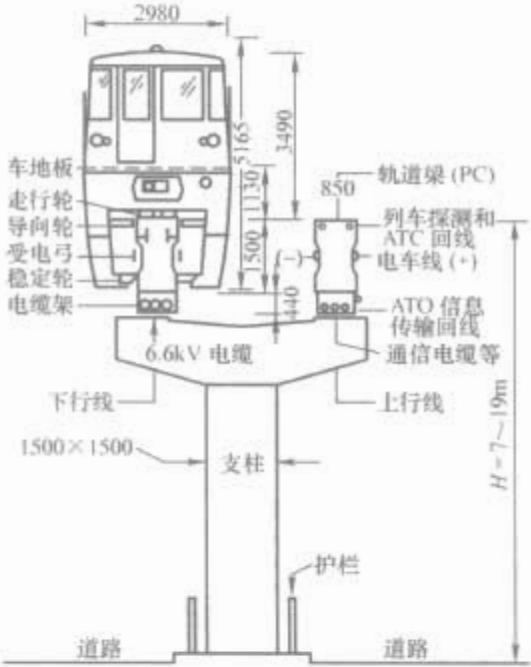


图 2.2-16 跨坐式单轨铁路

(1) 特点。单轨交通具有如下特点：

- 1) 占地少。因轨道结构窄，且又架设在道路上方，不需要很大空间，通过支柱铺设轨道梁，每根支柱直径为 1~1.5m。双线轨道梁的线路断面总宽约为 5~7m，与其他铁路轨道相比是较窄的。
- 2) 承担运量中等。介于公共汽车与轻轨交通之间，单向运量 5000~20 000 人/h。
- 3) 适应复杂的地形要求。

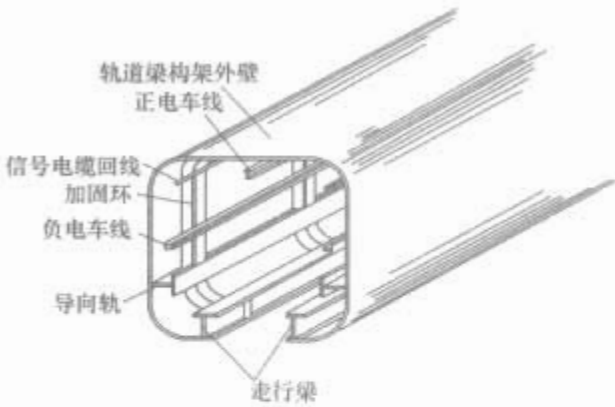


图 2.2-17 悬挂式单轨的轨道梁

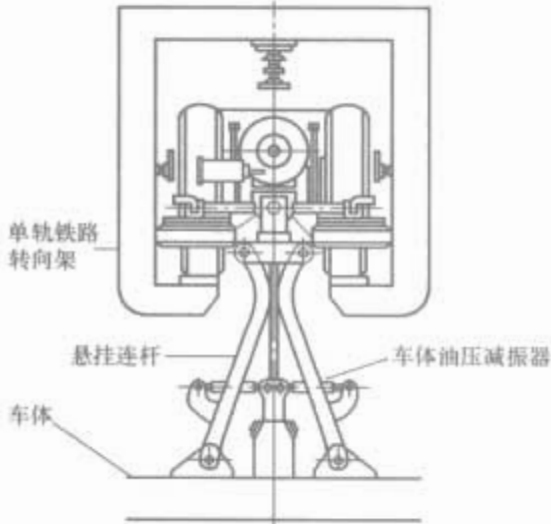


图 2.2-18 悬挂式单轨车辆的吊挂系统

- 4) 建设工期短、施工简便、造价低，一般仅相当于地铁造价的 1/3。
- 5) 运输安全、无事故，抱在轨道上，无脱轨的危险。
- 6) 噪声低、无废气污染。采用橡胶轮胎、噪声低；电力驱动，无废气排放。
- 7) 有利于美化城市。空中遮光少，起到美化、点缀城市的作用。
- 8) 乘坐舒适。采用橡胶轮和空气弹簧的转向架，运行平稳舒适。

(2) 跨坐式单轨车辆技术参数。我国刚开始起步，重庆市从日本引进了一条单轨线路。下面暂列出日本跨坐式和悬挂式单轨车辆的技术参数，见表 2.5-17 和表 2.2-18。

表 2.2-17 跨坐式单轨车辆的技术参数

参 数		大型车	标准车	备 注
列车编组辆数		4 辆，两端动车设司机室		
载客人数(人)	座位	148	148	
	站位	232	208	0.35m ² /人
超员载客人数(人)		1070	878	0.1m ² /人
总长(m)		60.2	56.2	包括车辆之间的间隙
总宽(m)		2.98	2.98	
总高(m)		3.39	3.61	距轨面高度
轴重(t)		11	10	
自重(t)		108/列	104/列	
轨道梁尺寸(mm)		850×1500×20 000	800×1400×20 000	宽×高×长
最高速度(km/h)		80	80	
线性加速度[km/(h·s)]		3.5	3.5	
减速度[km/(h·s)]	标准	4.0	4.0	
	紧急	4.5	4.5	

表 2.2-18 悬挂式单轨车辆的技术参数

参 数		大型车	标准车	备 注
列车编组辆数		4 辆，两端动车设司机室		
载客人数	座位(人)	180	172	0.35m ² /人
	站位(人)	200	126	
超员载客人数	座位(人)	180	172	0.1m ² /人
	站位(人)	890	546	
尺寸(m)	总长	68.1	54.1	包括车辆之间的间隙 最大宽度 车体
	总宽	2.66	2.51	
	总高	2.95	2.95	
轴重(t)		9.5	7.5	
自重(t)		头尾车各 21.54 中间车各 20.28	头尾车各 19.00 中间车各 17.98	
动轮对轴(mm)		880	840	
性能	最高速度(km/h)	80	80	
	线性加速度[km/(h·s)]	3.5	3.5	
	标准减速度[km/(h·s)]	3.5	3.5	
	紧急减速度[km/(h·s)]	4.5	4.5	

2.5.5 城轨车辆的电传动系统构成

城轨车辆的电传动系统分为直—直传动系统和直—交传动系统。前者曾经占统治地位，但随着电力电子技术和微电子技术的发展，正在迅速向交流传动系统发展。

2.5.5.1 直—直传动系统

采用直流传动技术改变直流牵引电动机的端电压和磁通，即可控制速度；改变电枢电流和磁通即可控制牵引力。

其控制有很多方法，主要有凸轮变阻控制、磁场斩波控制、电枢斩波控制和四象限磁场斩波控制等。

(1) 凸轮变阻控制。凸轮变阻控制主要是利用凸轮轴组合开关，将起动或制动时串入电动机电路的起动或制动电阻，随着车速的提高或降低而逐步切除，使电枢电流保持在一定范围内。为了达到平稳调速的目的，往往要增加启、制动级数，同时要进电动机组的串、并联转换和磁场削弱控制。凸轮变阻控制车辆的主电路原理及控制特性见图 2.2-19。

(2) 斩波调阻控制。斩波调阻控制方式适用于串励电动机的电阻控制，斩波器与电阻并联，可实现电阻无级调节。其主电路原理如图 2.2-20 所示。

(3) 电枢斩波控制。采用电力电子斩波器，通过改变斩波器的开通时间 t_{on} 与关断时间 t_{off} 的比例，即可改变负载（电机）侧的电压和电流的平均值。若斩波周期 $T=t_{on}+t_{off}$ 固定不变，则形成定频调宽方式。负载电压的平均值可用式 (2.2-69) 表示，即

$$U_2 = U_1 \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = U_1 \frac{t_{on}}{T} = U_1 \alpha \tag{2.2-69}$$

式中： U_1 为电源电压； U_2 为负载电压（平均值）； α 为导通比， $\alpha=t_{on}/T$ 。

由式 (2.2-69) 可知，若改变 α ，使 α 由 0~1 逐渐变化，即可使负载电压从 0~ U_1 变化。

随着电力电子器件的发展，斩波控制技术经历了使用普通晶闸管、逆导晶闸管和门极关断晶闸管（GTO 晶闸管）三个阶段。鉴于 GTO 晶闸管、IGBT 斩波器的体积和质量轻，所以目前世界各国的斩波控制的车辆大多使用 GTO 晶闸管、IGBT 斩波器。图 2.2-21 是电枢斩波车主电路原理图。

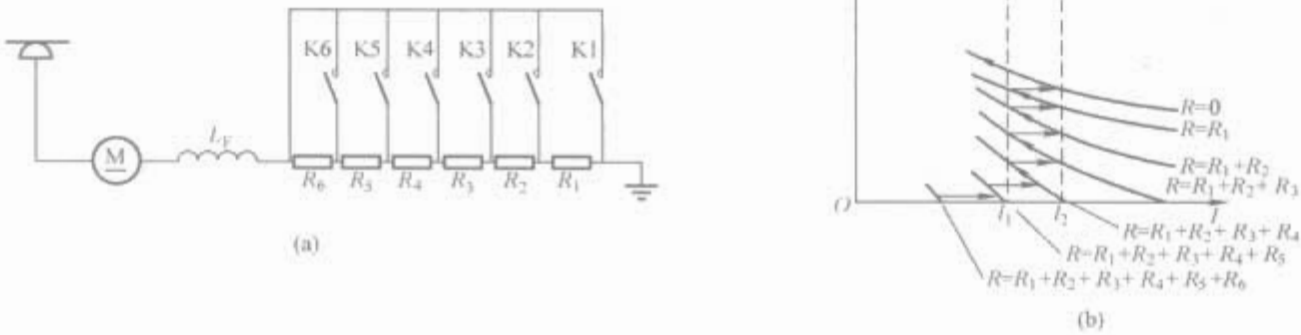


图 2.2-19 凸轮变阻控制车的主电路和控制特性
(a) 主电路原理；(b) 控制特性

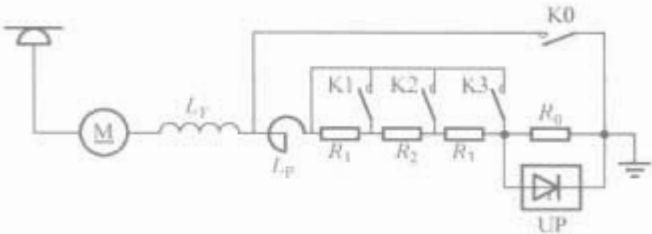


图 2.2-20 斩波调阻控制主电路原理

(4) 四象限斩波控制。四象限斩波控制适用于直流他励电动机。其特点是电枢与磁场是独立斩波的，可以灵活地改变励磁电流的大小和方向，省掉前后向切换开关和牵引/制动转换开关，从而实现主电路无触点化，减少维修作业量，再生制动效果更好，但斩波器的数量较多。图 2.2-22 是四



图 2.2-21 电枢斩波车主电路原理图
(a) 牵引；(b) 再生

象限斩波控制的主电路原理图。

2.5.5.2 三相交流传动系统

目前用于地铁车辆上的异步牵引电动机主要是三相笼型异步电动机和异步直线电动机。笼型异步电动机的速度特性和牵引力特性可用式 (2.2-70) 表示，即

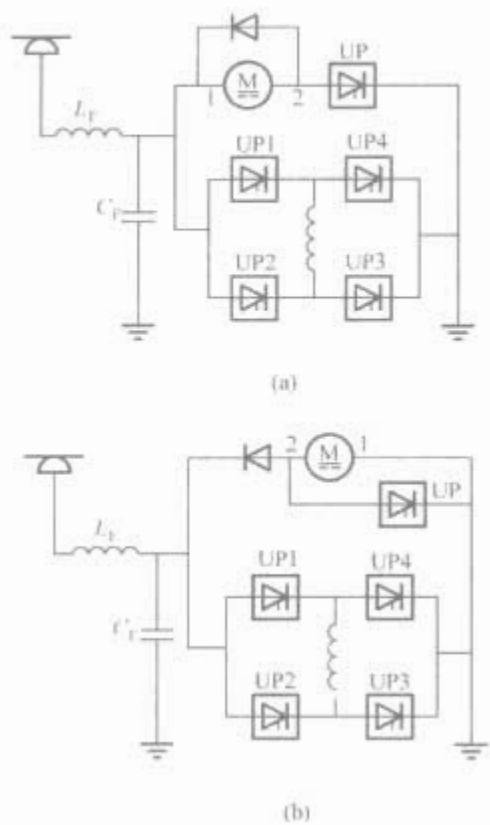


图 2.2-22 四象限斩波励磁控制主电路原理图
(a) 牵引; (b) 再生

$$n = 60 f_r / p$$
$$M = K (U / f_i)^2 f_s$$
$$f_i = f_r + f_s \text{ (牵引时)}$$
$$f_i = f_r + f_s \text{ (再生时)}$$
$$s = (f_i - f_r) / f_i = f_s / f_i$$

(2.2-70)

式中： n 为转速； M 为转矩（牵引力）； f_i 为逆变电源频率； f_r 为转子旋转频率； f_s 为转差频率； s 为转差率； U 为电动机端电压； p 为电动机极对数。

从式（2.2-70）可知，转速主要取决于逆变电源频率 f_i ，牵引力决定于电动机的电压频率比 (U/f_i) 和转差频率 f_s 。因此只要控制电动机的端电压、电源频率和转差频率，即可达到控制速度和牵引力的目的。

2.5.6 直线感应电动机驱动车辆的原理和特点

2.5.6.1 驱动原理

直线感应电动机的驱动原理与一般旋转式感应电动机相类似，可看成是旋转电机沿半径方向剖开展平，如图 2.2-23 所示。定子部分是在用硅钢片叠压成扁平形状的铁心上，放入两层叠绕的三相线圈构成，沿纵向固定安装于车辆底架下部或转向架构架下部。而转子部分亦展平变为一条感应轨，铺设在两走行轨之间，一般由铝板或铝合金制成的外壳和铁心组成。定子与转子感应轨之间应保持 8~10mm 的间隙，当通过交流电时，由于磁场的相互作用产生推力，推进车辆

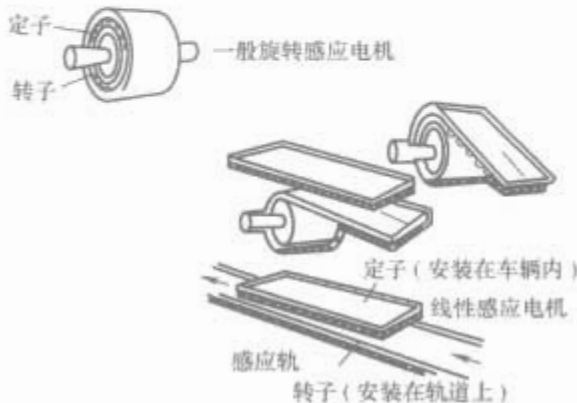


图 2.2-23 直线电动机驱动原理

运行或制动车辆。

直线电动机车辆采用交流变频变压控制，取消了传统的旋转电动机，而变成直线运动，因此，减少了机械减速传动机构，减轻重量同时又使结构简单，转向架变得很简单，可以采用小轮径的径向转向架。

2.5.6.2 直线电动机车辆的特点

- (1) 由于不存在传动装置及轮轨之间的磨耗，可降低噪声 10dB (A)。
- (2) 容易实现径向转向架，提高小半径曲线的通过能力。
- (3) 省去一系列传动机构，因而可减轻重量和缩小外形尺寸，可使隧道变小而降低土建造价。
- (4) 车辆的加减速可靠、磨耗小、爬坡能力强。因靠直线电动机驱动，不受轮轨之间的黏着力影响，没有车轮滑行的现象。
- (5) 直线电动机最大的缺点是效率低，约为旋转电动机的 70%，主要原因是定、转子之间的间隙较大，导致磁损耗大。另外需铺设一条与线路等长的感应轨，工艺要求高，附加工程投资大，控制技术复杂。

3 主传动系统

轨道交通主传动系统是由产生牵引力和制动力的各种电气设备连接成的一个电气系统，用以实现机车的功率传输。即把从电网或柴油发电机输入的电能转换成机械能，变成轮对的力矩而形成牵引力。它决定了机车的电传动的类型，还对机车的特性和维修费用等技术经济指标起重要作用。主传动系统应满足机车起动、调速及制动三个基本工况的要求，并与辅助电路和控制电路一起实现不同运行条件下调节牵引力和速度的作用。

如上所述，轨道交通主传动系统可以分成直流传动和交流传动两大类，而直流传动又可分为直—直流传动和交—直流传动，交流传动又可分为直—交传动和交—直—交传动。由于直流电动机调速方法十分简便，因此历史上长期占统治地位，直到 20 世纪 80 年代开始，调压调频的交流传动才成功开发，目前已经大量应用在轨道牵引领域，成为当前主流技术模式。

直流传动中直—直流传动为工矿机车和城轨列车的早期常用方式，通过调节电动机端电压和磁场两种方式，从而产生相应的主传动方式，主要有凸轮变阻、斩波调阻、斩波调压、四象限斩波、调磁等几种。上海地铁车辆的 1 号线采用 GTO 斩波调压方式，而现在新生产和采购的大都是调压变频的交流传动方式。

交—直流传动主电路在干线电力机车、内燃机车和电动车组中比较常用，但交流传动主电路发展势头迅猛，包括城轨车辆的直—交传动和电力机车与电动车组的交—直—交主传动系统，大有取代交—直流传动之势，这是本节中干线铁路重点叙述的内容。

3.1 交—直流传动系统

3.1.1 干线电力机车和动车

我国干线电力机车、动车组采用单一的 25kV、50Hz 供电制。

3.1.1.1 主电路

交—直流传动机车和动车的主要特征是单相工频交流供电，经整流、调压、滤波后供电给直（脉）流牵引电动机，实现功率传输。由于需要整流电路，它又被称为整流器式电力机车；

当用晶闸管相控调压装置时，又被称为相控电力机车。

主电路主要功能如下：

- (1) 在网压变动范围内机车能正常运行，并有一定的过载能力。
- (2) 能改变机车运行方向和转换牵引、制动状态。
- (3) 在牵引力—速度允许范围内能获得机车起动、调速和制动时的各种运行特征。
- (4) 具有较好的供电性能指标（功率因数与谐波分量）。
- (5) 具有较高的机车黏着质量利用率。
- (6) 具有较完善的保护电路。
- (7) 具有故障隔离、继续维持运行的电路。
- (8) 具有库用动车、旋轮的转换电路。

设计主电路时要考虑的主要因素有牵引电动机的类型、供电方式、牵引电动机的连接方式、整流电路、动力制动方式和调速方式。

(1) 整流电路和供电方式。电力机车常用中轴式和桥式两种整流电路（见图 2.2-24）。由于容量相同条件下所需牵引变压器容量的差异（中轴式为桥式的 $\sqrt{2}$ 倍），因此桥式电路居多数。而中轴式是由引燃管机车整流电路演变而来的。

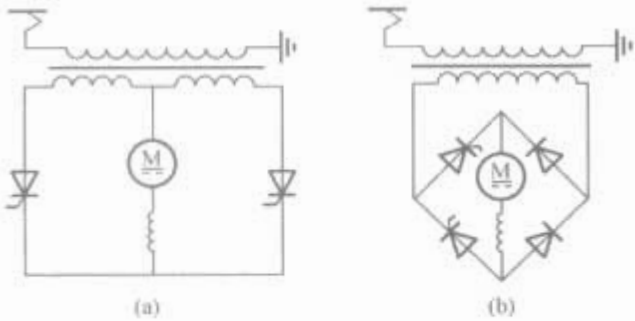


图 2.2-24 整流电路
(a) 中轴式；(b) 桥式

供电方式分全集中供电、半集中供电和独立供电 3 种，其结构特点和性能见表 2.2-19 和图 2.2-25。

表 2.2-19 供电方式			
项 目	全集中供电	半集中供电	独立供电
结构特点	整流装置集中供电给全车 6 台或 4 台并联的牵引电动机	每个整流装置供电给一台转向架的并联牵引电动机	每个整流装置单独供电给单台牵引电动机
性能	整流装置承受过载、短路的能力强，但故障影响范围大	整流装置有一定的承受过载、短路的能力，故障影响范围为半台机车，可设轴重转移电气补偿	整流装置承受过载、短路的能力差，要用快速熔断器进行保护，但故障影响范围小
应用机车	SS ₃ 等	SS ₄ ~SS ₉ 、8K 等	R _c 等

表 2.2-20 桥式整流电路			
形 式	全 控 桥 式	半 控 桥 式	
		对 称 式	不 对 称 式
原理图			
特 征	电路功率因数低，高次谐波严重，可实现再生制动	可改善电路功率因数，减少电网高次谐波，减少晶闸管数量，晶闸管也承受续流负载	可改善电路功率因数，减少电网高次谐波，减少晶闸管数量，晶闸管不承受续流负载

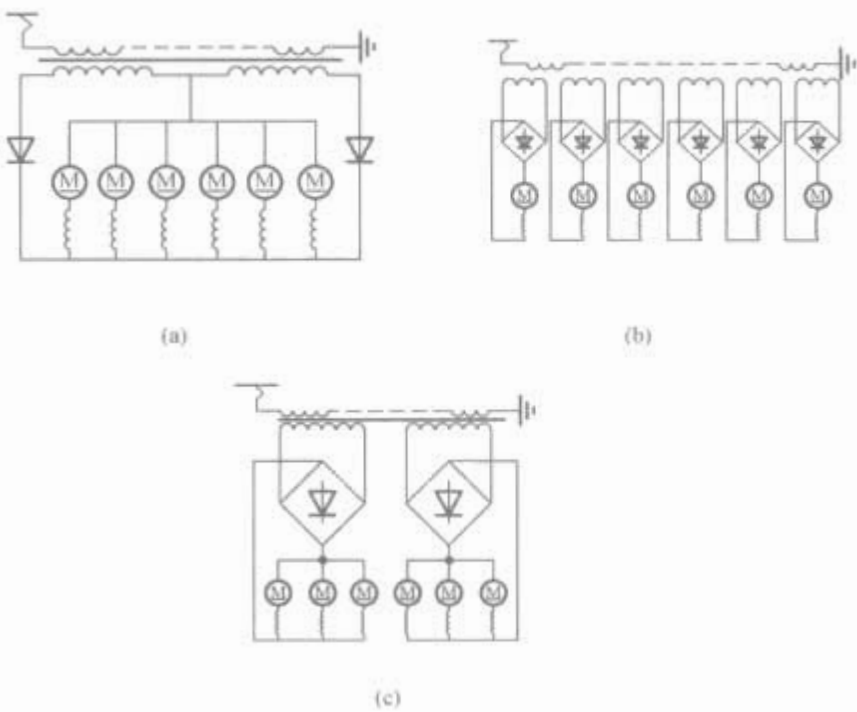


图 2.2-25 供电方式
(a) 全集中供电；(b) 半集中供电；
(c) 独立供电

(2) 调压电路。可分为牵引变压器分接调压、相控调压和功率因数补偿调压三种。

1) 牵引变压器分接调压。该调压方法要通过改变牵引变压器高压或低压侧绕组的分接电压，逐级调节牵引变压器输出电压，从而达到调节牵引电动机端电压的目的，但这种调压方法需要笨重调压开关，故障多，牵引力不均匀，冲击力大，所以调压开关机车被淘汰。

2) 相控调压。该方法是利用晶闸管在电源周期内不同的触发延迟角，控制其导通角和整流作用，将交流电变成平滑调节的整流电压，供电给牵引电动机，达到调速的目的。这种调压电路通常采用桥式整流电路（见表 2.2-20），可分为全控桥和半控桥两种形式。为了进一步改善相控调压电路的平均功率因数，除了以不对称半控桥形式工作（全控桥式亦以此形式工作）外，还通过增加相控桥的段数 n 来达到，使移相控制桥的功率为 $1/n$ （见表 2.2-21），干线电力机车相控桥数普遍采用 4~8 段。

3) 功率因数补偿（PEC）调压。用一定数量的容性负载补偿装置并接在牵引变压器的二次绕组上，兼作谐波滤波器（主要是 3 次谐波滤波器），可以提高相控机车的功率因数，此时相控桥的段数可以减少，一般为 2~3 段。补偿容量通常是机车牵引额定功率的 20%~50%。图 2.2-26 是 SS₃ 型机车采用 PFC 装置的主电路。PFC 装置的投入是通过检测机车无功功率的大小后分组控制的。

表 2.2-21 多段相控调压电路

形式	变压器二次侧多段桥串联整流电路	经济多段桥整流电路	晶闸管与低压开关组合的电路
原理图			
特征	串联的整流桥越多，无功功率及高次谐波越少；电路及设备复杂，一般不超过4段桥	用较少的晶闸管、整流管和较少的分段数，可得到等效的较多段桥的效果。图为8段桥电路	左图中增加转换开关，减少了晶闸管；右图中又进一步减少了整流管，均能改善功率因数及高次谐波，但开关的存在使电路未完全无触点化，相控性能受限制，且开关笨重

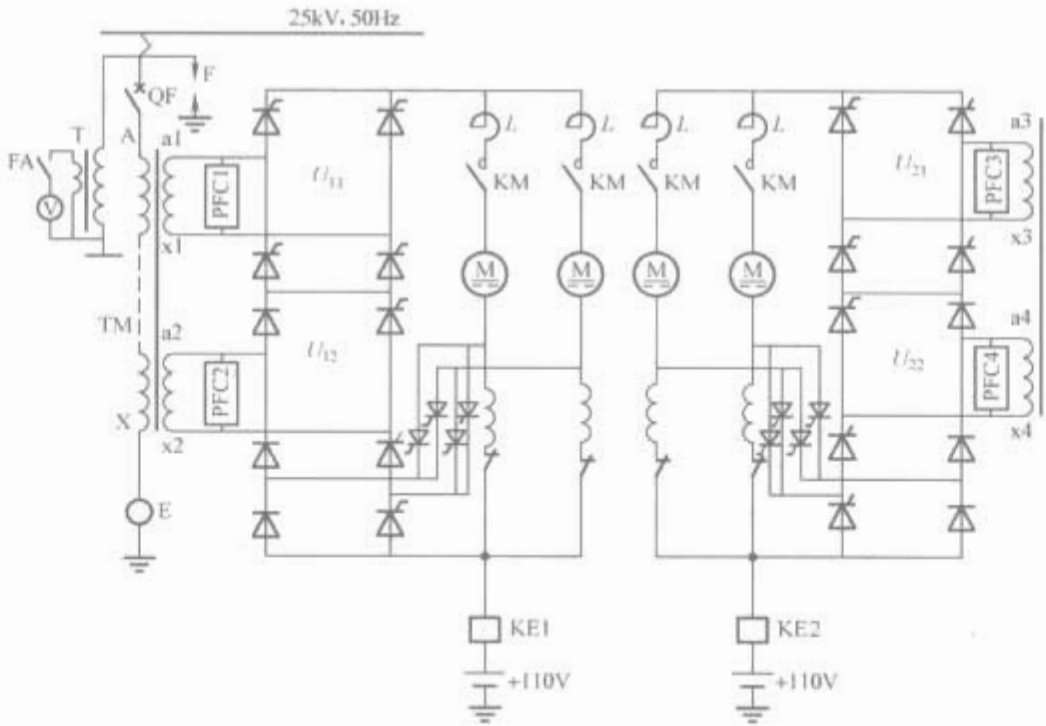


图 2.2-26 SS₅ 型机车主电路原理简图（牵引工况）

(3) 牵引电动机励磁方式及其调节。在交—直流传动系统中采用串励（多数）、他励和复励 3 种励磁方式（见表 2.2-22）。

项目	串 励	他 励	复 励
性能	牵引特性软，空转再黏着性能差，但并联电动机负载分配均匀	牵引特性硬，空转再黏着性能好，并联电动机负载分配不均匀，必须由独立励磁控制来解决	牵引特性、空转再黏着和负载分配性能等介于串励和他励之间，无需独立励磁
电机	结构简单	结构简单	较复杂，一般串励、他励比为 30 : 70 或 40 : 60
电路	简单	较复杂，2 个电源	2 个电源，较他励稍好
磁场控制	有级削弱或用晶闸管分路无级削弱，指标稍差	便于实现无级调磁，可省去方向转换器	便于实现无级调磁

3.1.1.2 工作特性

电力机车和动车的工作特性包括牵引特性、动力制动特性和整流特性。

(1) 牵引特性。包括牵引电动机转速特性、转矩特性和机车牵引特性。

1) 牵引电动机转速特性。指转速与电流的关系。直流串励牵引电动机转速特性用式 (2.2-71) 表示，即

$$n = \frac{U - I \sum r}{C_e \Phi} \tag{2.2-71}$$
$$C_e = \frac{pN}{60a}$$

式中：n 为牵引电动机转速，r/min；U 为牵引电动机端电压，V；I 为电枢电流，A； $\sum r$ 为电枢电路中电阻和， Ω ； Φ 为牵引电动机每极有效磁通量，Wb； C_e 为牵引电动机电势常数；p 为牵引电动机极对数；N 为牵引电动机电枢总导体数；a 为电枢绕组并联支路对数。

2) 转矩特性。指转矩与电流的关系，可用式 (2.2-72) 表示

$$M = C_m \Phi I \tag{2.2-72}$$
$$C_m = pN / 2\pi a$$

式中： C_m 为牵引电动机转矩常数。

把上述转速和转矩特性折算到机车动轮轮周时即为

$$F_1 = 3.6 \eta_k (C \Phi I - \Delta P / v) \tag{2.2-73}$$
$$C = ipN / (3.6 \pi a D)$$

$$v = (U - I \sum r) / C \Phi$$

式中： F_1 为单台牵引电动机折算到单轴的牵引力，N； η 为机械传动装置的效率； C 为机车速度常数； ΔP 为牵引电动机功率损耗，W； v 为机车速度，km/h； i 为齿轮传动比； D 为动轮直径（半磨耗），m。

3) 机车牵引特性。指机车牵引力与速度的关系。由式(2.2-73)可以得到机车牵引特性曲线，见图 2.2-5。图中表示了牵引特性曲线与级位的关系。

(2) 动力制动特性。包括电阻制动特性和再生制动特性两种。

1) 电阻制动特性

$$B_1 = 3.6(C \Phi I + \Delta P / v) \eta_c \tag{2.2-74}$$
$$v = I(\sum r + R) / C \Phi$$

式中： B_1 为单台牵引电动机的制动力，N； R 为制动电阻， Ω 。

机车制动力应为单轴制动力之和，即 $\sum B_1 = B$ 。

2) 再生制动特性

$$B_1 = 3.6(C \Phi I + \Delta P / v) \eta_c \tag{2.2-75}$$
$$v = [U_{di} + I(\sum r + R_B)] / C \Phi$$

式中： U_{di} 为逆变器平均输出电压，V； R_B 为再生稳定电阻， Ω 。

(3) 整流特性。以下提到的一些计算公式都是按理想整流器、交直流电抗为一定的假定下推导出来的。

1) 电流纹波因数 K_i

$$K_i = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}} \tag{2.2-76}$$

式中： i_{\max} 为整流电流最大值； i_{\min} 为整流电流最小值。

一般整流器式机车 K_i 取 25%~30%，随着牵引电动机换向措施完善（加全叠片机座），有的可达 40%~50%。

2) 整流换相和换相重叠角 γ 。整流电流从一个导电臂转移到另一个导电臂的转换过程，由于换相电抗的存在，是在一定的时间内完成的，这期间 2 个导电臂同时导电，产生重叠现象，这个转换过程称为整流换相。重叠期间的电角度称为重叠角 γ ，其值与交流电抗 x_a 、电源电压 $U_{2\max}$ 和整流电流 I_d 有关。用公式表示为

$$\cos \gamma = 1 - 2x_a I_d / U_{2\max} \tag{2.2-77}$$

式中： $U_{2\max}$ 为牵引变压器二次电压最大值，V； I_d 为整流电流平均值，A； x_a 为折算到牵引变压器二次侧的交流电抗。

3) 变压器阻抗电压百分数 U_k 和折算交流电抗 x_a 。按经验， U_k 一般取 10%~18%。 x_a 的计算式为

$$x_a = \frac{U_k}{100} \frac{U_{2e}}{I_N} + \frac{x_c}{K_T^2} \tag{2.2-78}$$

式中： U_{2e} 为牵引变压器二次绕组电压，V； K_T 为牵引变压器一、二次绕组匝比； I_N 为牵引变压器二次绕组电流额定值，A； x_c 为接触网及变电所电抗之和， Ω 。

4) 变压器二次绕组电压 U_2

$$U_2 = 1.11 \left(E_d + \lambda_1 \frac{2}{\pi} x_a + \lambda_2 R_2 K_1^2 + R_d K_2^2 \right) I_d + \Delta u \tag{2.2-79}$$

$$\Delta u = N \Delta u_1$$

$$\lambda_1 = 1 + 0.4 K_i$$

式中： Δu 为整流臂串联器件正向压降之和； N 为串联器件数； Δu_1 为单个器件正向压降； R_2 为折算到牵引变压器二次绕组的电阻值； R_d 为直流电路电阻（不包括牵引电动机电阻）； λ_1 为换相电抗电压修正系数，当电流纹波因数 K_i 在 0.25~0.3 时， λ_1 取 1.11，当采取 LC 容性补偿后， λ_1 要重新考虑； K_1 为变压器有效系数，当 $K_1=0.25\sim0.3$ 时， $K_1^2=0.95$ ； K_2 为整流电流有效系数， $K_2=0.25\sim0.3$ 时， $K_2^2=1.04$ ； λ_2 为修正系数，当 $u_k=10\%\sim15\%$ 时， λ_2 取 0.7。

5) 牵引变压器二次有效电流 I_2

$$I_2 = \sqrt{\sum_{n=1}^k I_n^2} \tag{2.2-80}$$

式中： I_n 为二次电流中 n 次谐波电流有效值。

6) 网侧等效干扰电流 J_p

$$J_p = \sqrt{\sum_{n=1}^k (S_n I_n)^2} / \left(\frac{U_1}{U_2} \right) \tag{2.2-81}$$

式中： S_n 为谐波杂音评价系数，它为国际 CCITT（国际电话咨询协会）的规定值（见表 2.2-23）。

表 2.2-23

CCITT 规定的谐波杂音评价系数

频率(Hz)	50	150	250	350	450	550	650	750	800	850	950	1000	1050
次数(n)	1	3	5	7	9	11	13	15	16	17	19	20	21
$S_n/0.001$	0.71	35.5	178	376	582	733	851	955	1000	1035	1109	1122	1109
频率(Hz)	1150	1250	1350	1450	1550	1650	1750	1850	1950	2050	2150	2250	2350
次数(n)	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47
$S_n/0.001$	1035	977	928	881	842	807	775	745	720	698	679	661	643
频率(Hz)	2450	2550	2650	2750	2850	2950	3000	3500	4000	4500	5000	5500	
次数(n)	49	51	53	55	57	59	60	70	80	90	100	110	
$S_n/0.001$	625	607	590	581	571	553	534	525	376	178	56.2	<15.9	

7) 位移因数

$$\cos \varphi = B_{1m} / \sqrt{A_{1m}^2 + B_{1m}^2} \tag{2.2-82}$$

式中： A_{1m} 、 B_{1m} 分别为傅里叶分析系数。

如果考虑牵引变压器电流与其基波分量同时过零，则整流器机车的 $\cos \varphi$ 近似为

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} (1 + \cos \gamma) \tag{2.2-83}$$

8) 机车功率因数 λ

$$\lambda = \xi \cos \varphi = U_1 I_1 \cos \varphi / \sum_{n=1}^k U_n I_n \tag{2.2-84}$$

式中： ξ 为基波因数（基波电流与总电流之比）； U_1 、 I_1 分别为网侧电压、电流基波有效值； U_n 、 I_n 分别为网侧电压、电流 n 次谐波有效值。

9) 干扰电流系数 F_i

$$F_i = J_p / I_1 \tag{2.2-85}$$

10) 平波电感 L （多段相控桥）

$$L = \frac{\sqrt{2}}{2\omega K_f I_d} \frac{f(a,n)_{\max}}{8} \quad (\text{H}) \quad (2.2-86)$$

式中： $f(a,n)_{\max}$ 为整流电压最大脉动的相对值，它为满开放段数 n 、触发延迟角 α 及 I_d 的函数。

计算平波电感值，应以最后一段桥移相时 $f(a,n)_{\max}$ 为依据。

11) 多段半控桥电路功率因数理论计算。对多段半控桥，设 $n-1$ 段桥以前为全开放，而第 n 段正在进行移相调压，并假定满足理想整流器的条件和电网电压波形不畸变，则有

$$\lambda = \sqrt{2}[(2n-1) + \cos a_n] / \sqrt{\pi[n^2\pi - 2(2n-1)a_n]} \quad (2.2-87)$$

$$U_d/U_{d\max} = [(2n-1) + \cos a_n] / 2n$$

式中： U_d 为整流电压平均值； $U_{d\max}$ 为整流电压最大平均值； a_n 为第 n 段桥移相触发延迟角。

举例，根据式 (2.2-87) 可以计算出四段半控桥第四段移相时功率因数 λ ，见表 2.2-24。

表 2.2-24 四段半控桥第 4 段移相时功率因数值

α_4	180°	150°	139°	120°	90°	60°	36.6°	30°	0°
$U_d/U_{d\max}$	0.750	0.767	0.780	0.813	0.875	0.938	0.975	0.984	1.0
λ	0.90	0.867	0.864	0.870	0.890	0.912	0.919	0.918	0.90

不同调压方式下单相整流电路的功率因数理论计算 $\lambda = f(U_d/U_{d\max})$ 如图 2.2-27 所示。

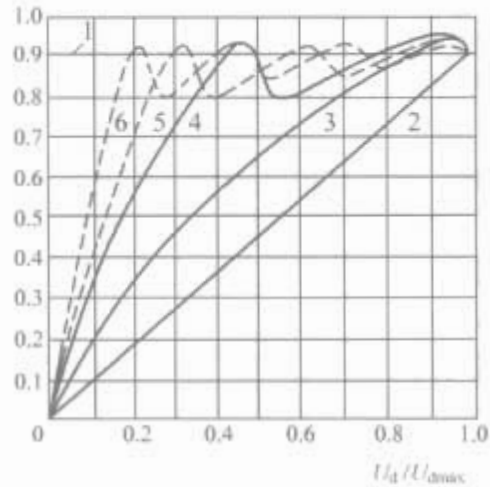


图 2.2-27 单相整流电路不同调压方式下的功率因数 $\lambda = f(U_d/U_{d\max})$
1—单相不可控整流桥；2—单相全控桥（一段桥）；3—单相半控桥（一段桥）；4—单相半控二段桥；5—半控三段桥；6—半控四段桥

3.1.2 电传动内燃机车和动车

3.1.2.1 主电路

早期生产的 DF₂ 型以及进口的 ND₁、ND₂ 是采用柴油机—直流主发电机—直流电传动系统，直接输出直流电压供给 6 台串励牵引电动机，通过调节柴油发电机主手柄的挡位来调节主发电机的输出电压，从而调节机车牵引力。达到最高挡位输出电压最大值后，还可以通过磁场削弱开关，进行牵引电动机的磁场分路来提高运行速度。后期生产的干线电传动内燃机车（DF_{4A} 型，DF_{4B} 型，DF_{4C} 型，DF_{4D} 型，DF_{4E}～DF₈ 型）中，均采用交流同步发电机为其主发电机，成为交—直流电传动电气系统。随着交流同步发电机的功率增大和可靠性提高，取代了直流系统，得到广泛应用，如 DF₄～DF₁₂ 型以及 ND₄、ND₅ 型机车采用。

(1) 整流供电电路。为三相桥式整流电路，其功能主要是把柴油—发电机输出的三相交流电压整流成直流电压电

源，供电给并联的 6 台串励牵引电动机。图 2.2-28 为三相整流电路示意图。

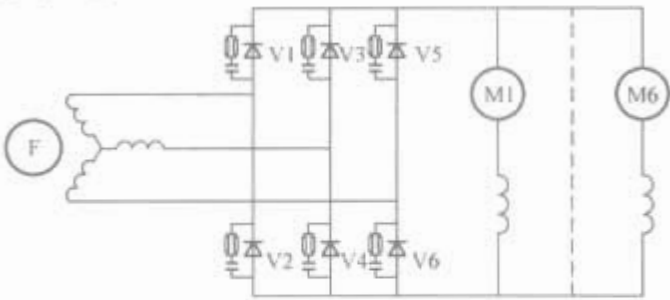


图 2.2-28 三相整流电路示意图

由于三相整流电压的波形系数较好，整流电压纹波系数较小，因此不需要设置平波电抗器进行滤波就可以供电给直流牵引电动机。

(2) 调压电路。通过柴油机的主手柄调节供油量，改变主发电机的转速而改变输出电压；同时通过对主发电机的励磁机的励磁电流进行调节，使励磁机的输出电流改变，从而使发电机输出电压达到所要求值。

与电力机车直流电动机调速一样，电传动内燃机车调速方法也是靠调节电动机端电压和电机励磁场电流来实现。牵引电动机调速公式 [同式 (2.2-71)] 为

$$n = \frac{U - I \sum R}{C_e \Phi}$$

通常主电路中串励牵引电动机的磁场绕组，还设有并联分路电阻开关，进行 1～2 级磁场削弱的调速控制。

3.1.2.2 工作特性

(1) 同步发电机的恒功率特性。一台柴油机在一定速度下，能发挥一定数量的功率，在恒定转速下的功率叫做柴油机的额定功率 N_N ，又叫有效功率。对应柴油机主手柄的某个挡位能发出经济特性的功率是一定的，如果超载或欠载对柴油机不利，或者令其发挥的效率不好，则内燃机车上柴油机的有效功率，即柴油机曲轴向外输出的有效功率最好是恒定。该有效功率 N_N 包含柴油机轴上直接或间接驱动的辅助装置的功率 N_f 和输入牵引整流电路的直流侧功率 P_F 两部分之间的关系，可由式 (2.2-88) 表示，即

$$P_F = (N_N - N_f) \eta_F \eta_R = U_F I_F \times 10^{-3} \quad (2.2-88)$$

式中： P_F 为牵引发电机直流侧功率，kW； N_N 为柴油机有效功率，kW； N_f 为由柴油机驱动的辅助装置功率，kW； η_F 为牵引发电机效率； η_R 为整流装置效率； U_F 为整流输出电压，V； I_F 为整流输出电流，A。

机车上辅助设备所消耗的功率约占总功率的 8%～15%，它决定于辅机的工况，与机车运行无关。 η_F 、 η_R 与负载电流变化不大，在忽略上述因素的变化后，则上述保持柴油机功率恒定不变的要求，就成为要求牵引发电机直流侧的功率 P_F 保持不变，即是牵引发发电机的理想外特性曲线 $U_F = f(I_F)$ ，如图 2.2-29 所示为一条等边双曲线。

图 2.2-29 中，理想外特性是一条具有限流、限压和恒功率三个区段的曲线，如图中的 abcde，c 点是对应于牵引发发电机的持续电流 I_{FC} ，b 点对应最高电压 $U_{FP\max}$ ，受到励磁绕组发热的限制，d 点对应 $I_{FP\max}$ ，主要受到机车黏着的限制。bc 段为恒功持续工作区，cd 段为恒功短时工作区。对于 c 点的电压 U_{FdN} ，称为额定最低电压，它与最高电压 $U_{FP\max}$ 之比，称为牵引发电机恒功持续范围的调压比，即

$$K_{pu} = \frac{U_{FP\max}}{U_{FdN}} \quad (2.2-89)$$

调压比 K_{pu} 是衡量牵引发电机恒功率曲线持续工作范围的大小的参数。其值越大，机车恒功运行的调速范围越

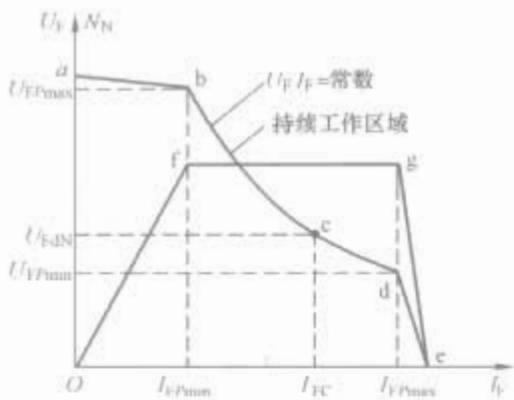


图 2.2-29 牵引发电机的理想外特性曲线

宽，但会带来电机质量、尺寸的加大。DF_{4B}型机车的 K_{pu} 约为 1.4。为了获得较大的 K_{pu} 值，还采用牵引电机的二级磁场削弱控制。

为了使固定转速和励磁电流时的发电机的自然外特性 $U_f = f(I_f)$ 变为柴油发电机组所需的理想外特性，控制系统必须进行励磁调节，称为柴油发电机输出特性的恒功调整特性，由联合调节器和电子控制系统来实现。

(2) 机车牵引特性 $F = f(V)$ 。牵引特性曲线的计算是以柴油机输出的有效功率、硅整流装置输出的功率、牵引发电机的输出功率、牵引电动机的有关参数为依据。举例说明，计算 DF_{4B} 型机车的主整流装置输出功率 P_F 为

$$P_F = [(3300 - 264) \times 0.736 \times 0.96 \times 0.99] \text{ kW} = 2125 \text{ kW}$$

在获得 P_F 后，可以：①根据直流牵引电动机的转矩特性 $M = f(I)$ 换算出牵引力曲线 $F = f(I)$ ；②根据电动机的负载转速特性 $n = f(I)$ ，换算到机车的负载速度特性 $V = f(I)$ ；③再根据 $F = f(I)$ 和 $V = f(I)$ 计算出机车牵引特性曲线。这与交—直流传动电力机车的牵引特性类似。图 2.2-30 和图 2.2-31 分别表示了 DF_{4B} 型货运及客运机车的牵引特性曲线。

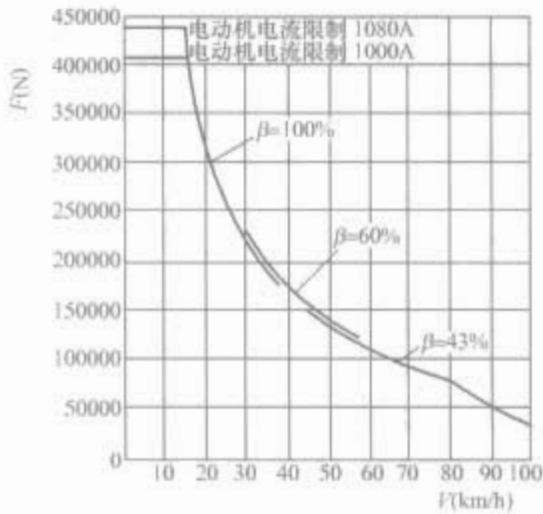


图 2.2-30 DF_{4B} 型货运内燃机车牵引特性曲线

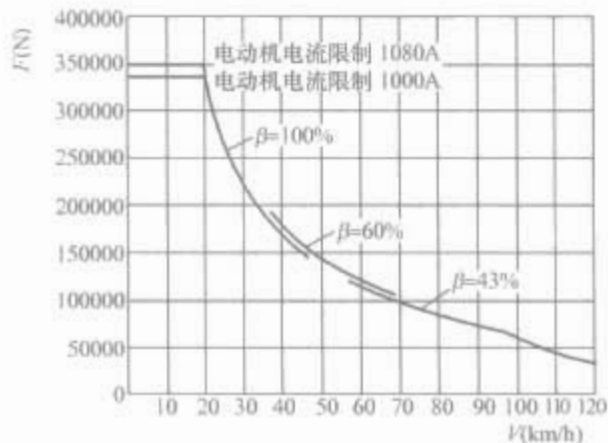


图 2.2-31 DF_{4B} 型客运内燃机车牵引特性曲线

(3) 电阻制动特性。它与交直流传动电力机车的电阻制动特性类似。

3.2 交流传动系统

3.2.1 交流传动技术的发展

在 20 世纪 80 年代前，高性能可调速传动都采用直流电动机，不变速传动则采用交流电动机。80 年代后，随着电力电子技术和微电子技术的发展，交流传动迅速取代直流传动成为技术的发展方向。

电力电子技术的进步是交流传动技术发展的物质基础。现代电力电子学是传统电力电子技术与微电子技术、计算机技术、自动化技术紧密结合的边缘学科，形成当今蓬勃发展的高科技产业。新型电力电子器件层出不穷：晶闸管→MOSFET、GTR、GTO→IGBT (IPM)、IGCT/IEGT。

转差—电流控制、矢量控制、直接转矩控制等控制策略的进步是交流传动技术发展的理论基础。现代控制手段的进步是其技术保证。过去由复杂的模拟—数字电路实现简单的控制功能；现在则是网络化控制、模块化结构，微机品质不断提升，由 8 位→16 位→32 位…；定点计算发展到浮点计算；以高速数字信号处理器为核心构筑实时控制器。

3.2.2 交流传动的优势

交流传动系统具有优越的运行性能、显著的节能效果、低廉的运营维护成本、良好的可靠性，解决了对信号和通信设备的干扰问题，成为发展铁路高速和重载运输的必然选择。具体有以下优点：

(1) 优异的牵引性能。由于采用异步牵引电动机，其陡峭的自然特性有利于提高黏着利用，能更好地发挥牵引力。

(2) 异步牵引电动机相对体积和质量小，单轴持续功率大。由于簧下质量小，有利于改善轮轨作用力。

(3) 机车恒功速度范围宽，恒功系数大，有利于实现客货通用型机车。

(4) 交流传动电力机车或动车可使供电网获得近似于 1 的功率因数，从而减小了供电网损耗，再生制动时还可向供电网反馈品质良好的电能，节能效果显著。

(5) 电力机车或动车由于采用四象限变流器，大大减少了供电网的电流谐波分量，改善了供电品质，解除了对通信信号的干扰。

(6) 由于异步牵引电动机无换向器，没有电刷与换向器磨损，提高了机车或动车可靠性，也降低了机车或动车制造和维修成本。

(7) 机车或动车的向前/向后、牵引/制动操纵无需位置转换开关进行主电路的转换，电路简单，可靠性高。

3.2.3 交流传动系统的基本要求

交流传动系统的基本要求如下：

(1) 满足特性要求。

(2) 系统稳定性要求。在整个调速范围内所有运行工况（牵引、制动）、所有负载（空载、轻载、满载）条件下系统应是稳定的。

(3) 系统鲁棒性要求。在各种外界扰动（负载、输入电源等）、被控对象物理参数变化等条件下，控制系统应满足精度及稳定性的要求。

(4) 系统稳态、动态性能要求。无静态控制偏差，动态响应快。

3.2.4 交流传动系统的基本组成模式

轨道交通交流传动系统形式多样。根据功率等级可分为

中功率和大功率两种；根据供电方式可分成柴油机带发电机供电的内燃机车交流传动系统、直流供电的地铁轻轨车交流传动系统、交流供电的电力机车和动车交流传动系统三种。

图 2.2-32 为柴油机带发电机供电的内燃机车交流传动系统的组成框图。柴油机驱动发电机，发电机发出三相交流电，经二极管不控整流输出直流电压，逆变器将直流电变换成三相变频变压交流电源，驱动交流电动机，实现对电动机转矩的控制。微机控制装置通过控制发电机的励磁电流控制直流电压，同时给出合适的转矩以使得柴油机在不同转速下输出合适功率。

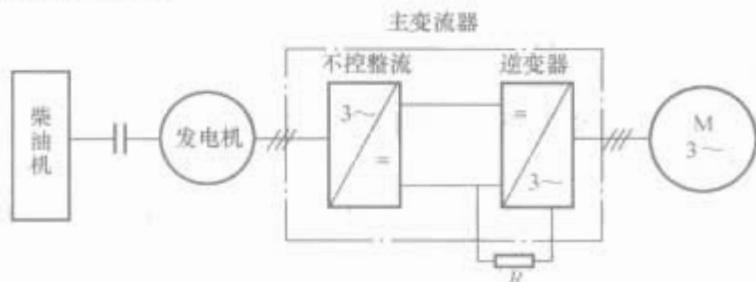


图 2.2-32 内燃机车交流传动系统组成框图

内燃机车交流传动系统的特点是：①不同手柄级位，对应不同柴油机转速、不同中间直流环节电压和不同功率限制；②系统惯性大，调节慢，同一手柄级位时，中间直流环节电压波动范围大；③电制动能量通过电阻吸收。

图 2.2-33 为直流供电的地铁轻轨车交流传动系统的组成框图。直流电源通过受电弓或第三轨从电网引下来，经高速断路器等高压电器到滤波电抗器，再接入逆变器。在传动控制单元的控制下，逆变器将输入的直流电能变换成变频变压的三相交流电，供给交流电动机，实现对交流电动机的控制，从而实现机电能量转换，达到调速目的。

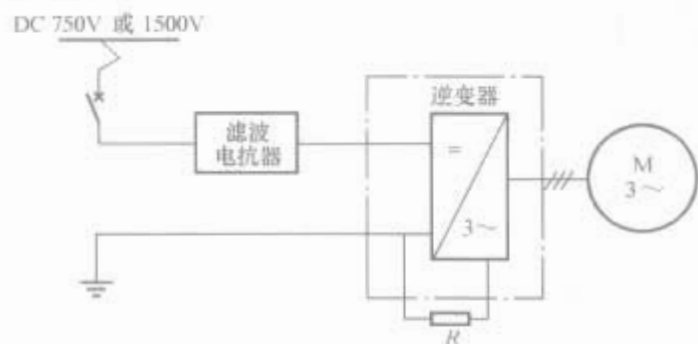


图 2.2-33 直流供电的地铁轻轨车交流传动系统组成框图

地铁轻轨车交流传动系统的特点是：①直流供电，电网电压波动范围较大；②起动、制动频繁，加、减速度大，间歇式运行，系统一般用小时制定额考核，而非持续定额；③电制动优先采用再生制动，也可通过电阻吸收。

图 2.2-34 为电力机车和动车的交流传动系统的组成框图。系统主要由牵引变压器、主变流器、交流电动机、传动控制单元等组成，而核心是变流技术和控制技术。电源从电网输入，经牵引变压器降压，传动控制单元控制四象限变流器完成交流到直流的变换，再控制逆变器完成直流到三相交流的变频变压变换，给交流电动机供电，达到对交流电动机转矩的控制。牵引时，能量是从电网流向电动机，电能转化成机械能；

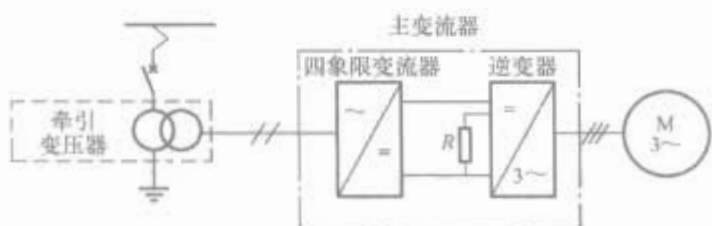


图 2.2-34 电力机车和动车组交流传动系统组成框图

制动时，过程相反，机械能转化成电能回馈给电网。

在传动控制单元的控制下，各部件有机地结合起来，实现电源的变换，由高压（25kV）、工频（50Hz）的不可控单相交流电源变换到三相可控变频变压的交流电源，供给交流电动机，实现对交流电动机的控制，从而实现传动控制的最终目的，即按照司机的指令控制机车的运行速度。

电力机车交流传动系统的特点是：①采用交—直—交系统；②中间直流电压恒定，③与电网接口友好；④再生制动。

3.2.5 交流传动系统主电路

3.2.5.1 二电平电路与三电平电路

在电压型变流器中，二电平电路较为多见，三电平电路也有应用。二者相比较，三电平电路的元件个数多一倍，带来的主要优点是直流电压提高、系统功率增大、接触网中电流的谐波含量减少（三电平四象限变流器）、交流电动机电流的谐波含量及转矩脉动减少（三电平四象限变流器）。二电平逆变器原理如图 2.2-35 所示；三电平逆变器原理如图 2.2-36 所示。

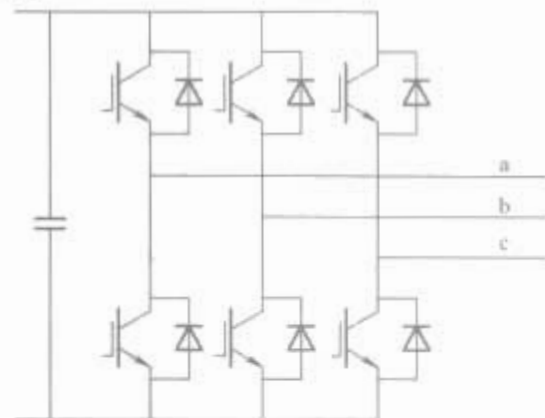


图 2.2-35 二电平逆变器原理图

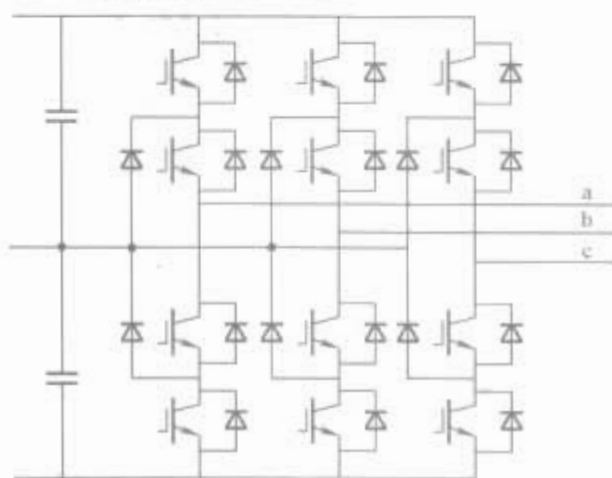


图 2.2-36 三电平逆变器原理图

3.2.5.2 控制模式

交流传动系统的主电路与机车、动车的控制模式密切相关。其控制模式分为整车控制、转向架控制、单轴控制三种。整车控制是指机车、每节动车上的电动机并联作为一个整体来控制；转向架控制是指一个转向架上的电动机并联作为一个整体来控制；单轴控制则是每台电动机单独控制。各种控制模式各有优缺点，需要根据功率、成本、可靠性等综合考虑。

交流传动系统的主电路还与四象限变流器重数相关。电力机车、动车组的四象限变流器重数一般是基于功率大小来考虑。当整车有多重四象限变流器时，整车的所有四象限变流器按等角度错开相位角进行调制，其结果相当于提高了牵引变压器一次绕组和接触网中的等效开关频率。

3.2.5.3 典型应用

图 2.2-37 为 4 轴电力机车的主电路原理图。主变流器

采用水冷 GTO 或 IGBT 变流器。一个主变流器有二重四象限变流器，转向架控制模式，一个逆变器驱动 2 台 1225kW 的交流异步电动机。图 2.2-38 为中速电动车组一节动车的主电路原理图，主变流器采用强迫风冷 IGBT 变流器，有二重四象限变流器，整车控制模式，逆变器 IGBT 元件并联后驱动 4 台 200kW 电动机。图 2.2-39 为地铁电动车组主电路原理图，逆变器有 2 个独立的逆变模块单元，每个单元驱动 2 台并联的三相交流异步牵引电动机。图 2.2-40 为引进高速动车组一节动车的主电路原理图，主变流器采用液体沸腾散热器强迫风冷 IGBT (IPM)，三电平主电路，整车控制模式，逆变器驱动 4 台电动机。

3.2.6 交流传动机车牵引特性

图 2.2-41 为交流传动机车和动车的一个典型牵引特性，对应的异步电动机特性分为恒转矩、恒功率和自然特性三个区间。准确地说，异步电动机特性分为恒磁通段和弱磁段，恒磁通段亦即 V/F 特性阶段，弱磁段则为恒电压阶段。异步电动机的转矩公式为式 (2.2-90)，即

$$M = \frac{pm}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \times \frac{f_2 x_m^2 / r_2'}{\left[r_1 + \frac{f_2}{f_1 r_2'} (x_m^2 - x_{11} x_{22}) \right]^2 + \left(x_{11} + \frac{f_2 r_1 x_{22}}{f_1 r_2'} \right)^2}$$

(2.2-90)

式中： m 为定子相数， $m=3$ ； f_1 为定子频率； p 为极对数； f_2 为转差频率； x_m 为励磁漏抗； x_{11} 为定子漏抗； x_{22} 为转子漏抗； r_1 为定子电阻； r_2' 为转子电阻。

异步电动机的输出转矩根据齿轮传动比、轮径和传动效率折合为机车和动车轮周牵引力。

3.2.7 交流传动系统的主要部件及关键技术

3.2.7.1 系统技术

(1) 系统设计。根据用户对机车或动车组牵引性能的总体要求，如供电制式、速度等级、编组形式、起动加速性能、加速时间、剩余加速度、轮径、轴重、设备安装方式

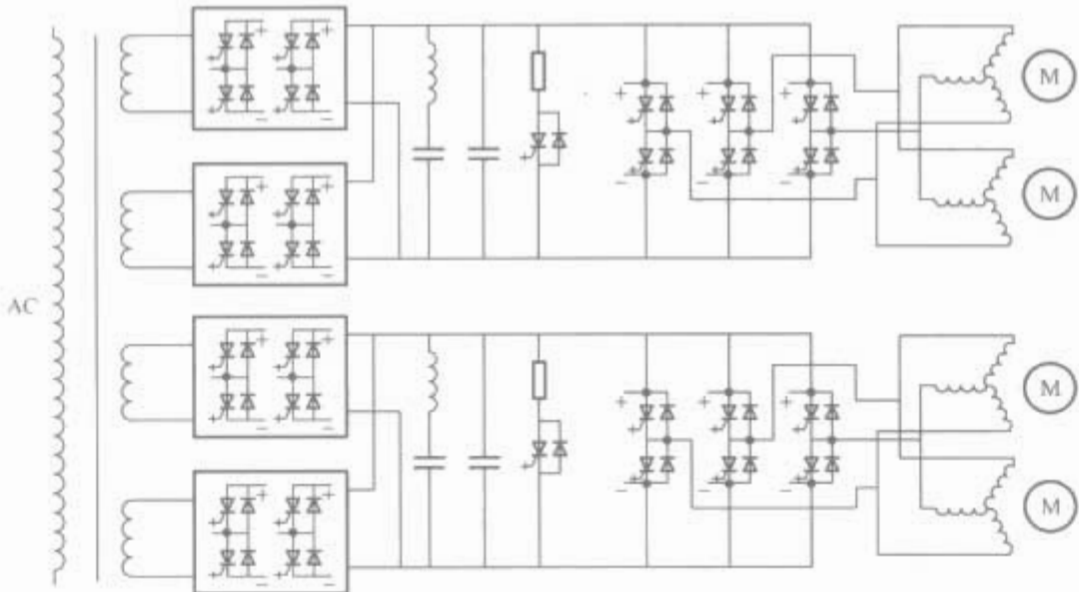


图 2.2-37 4 轴电力机车的主电路原理图

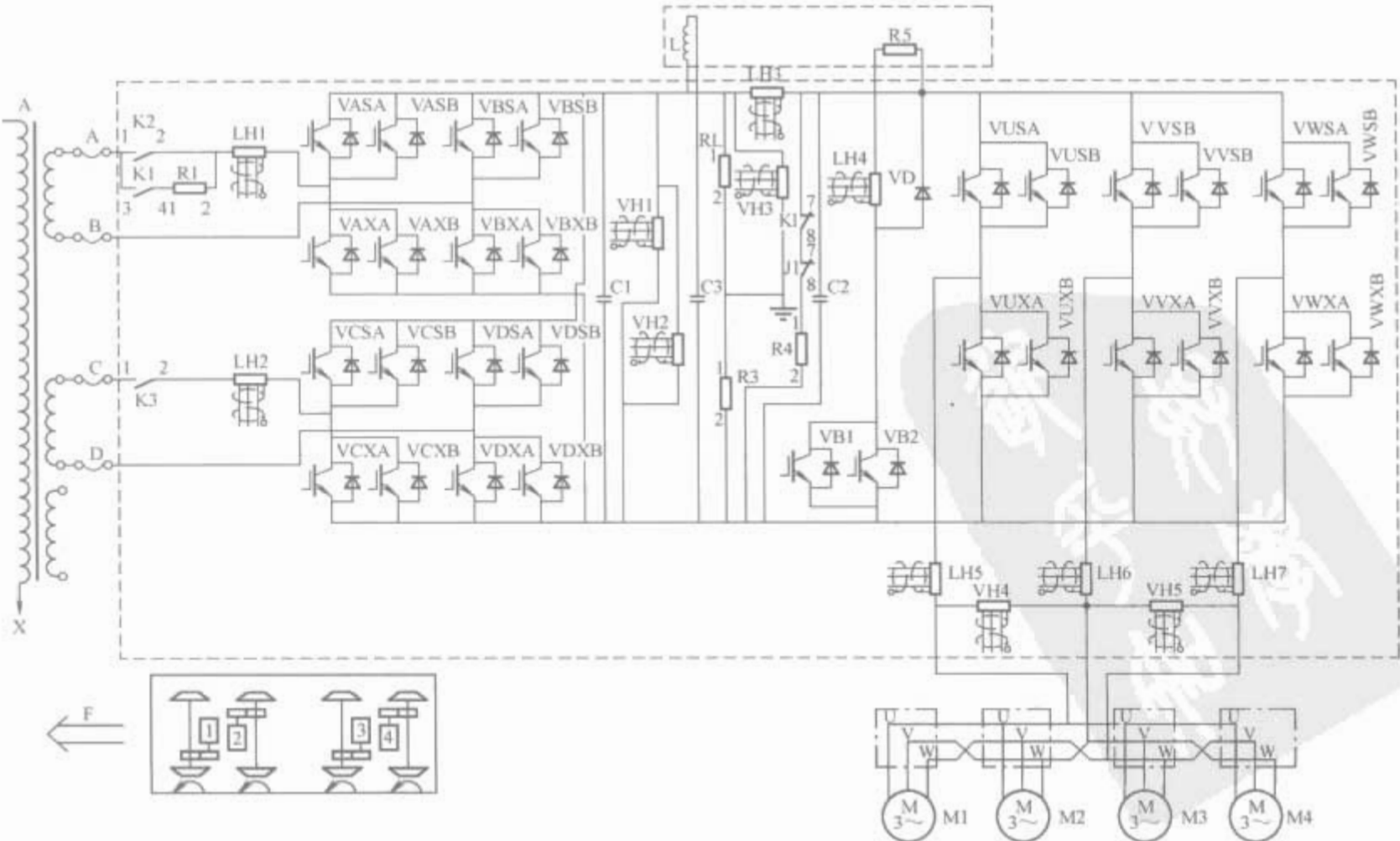


图 2.2-38 中速电动车组主电路原理图

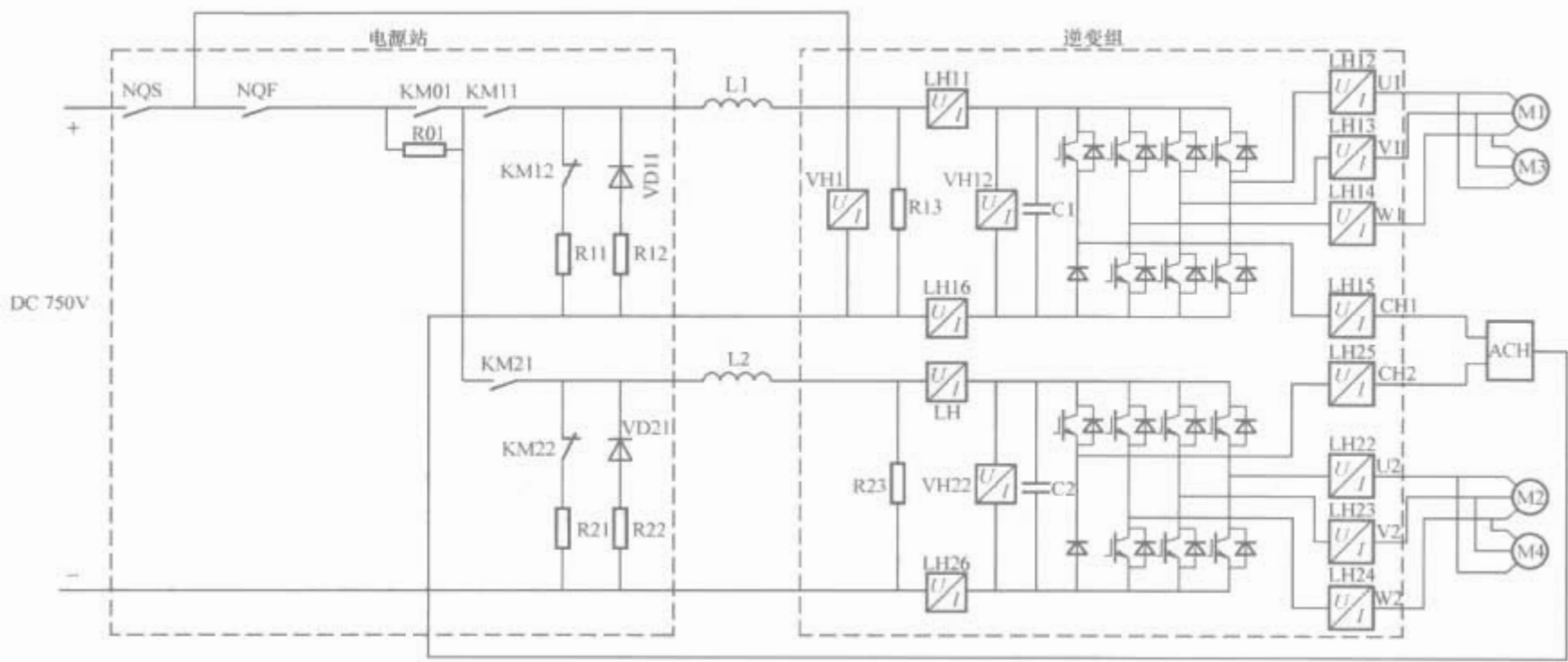


图 2.2-39 地铁电动车组主电路原理图

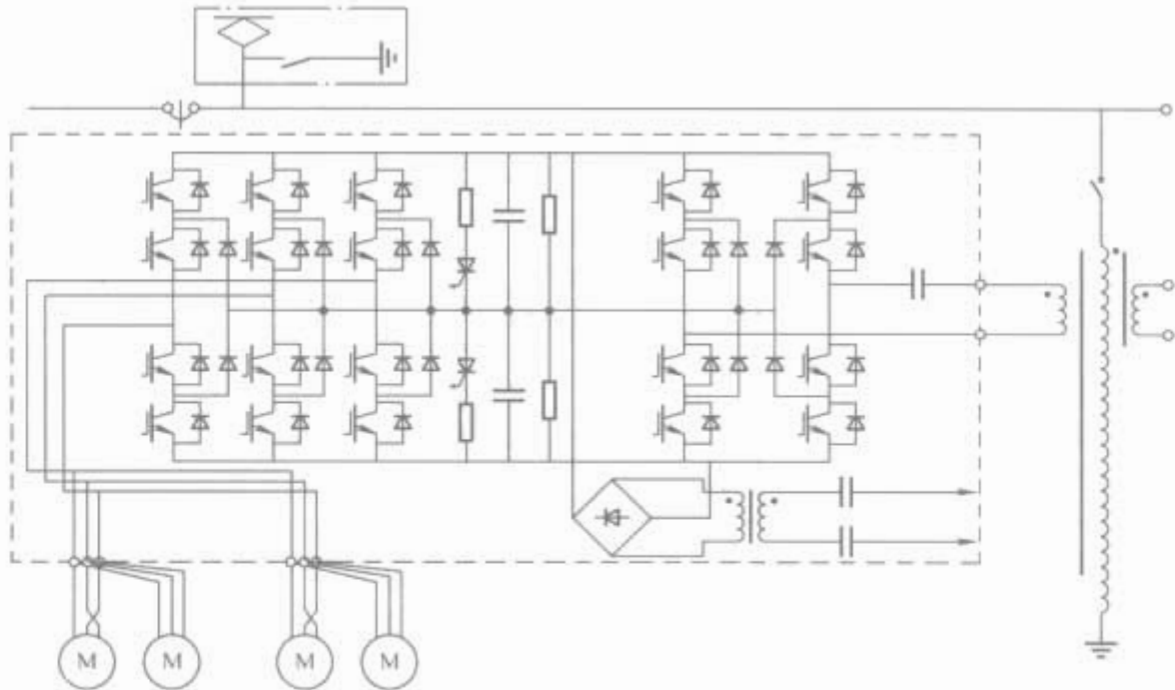


图 2.2-40 高速动车组动车主电路原理图

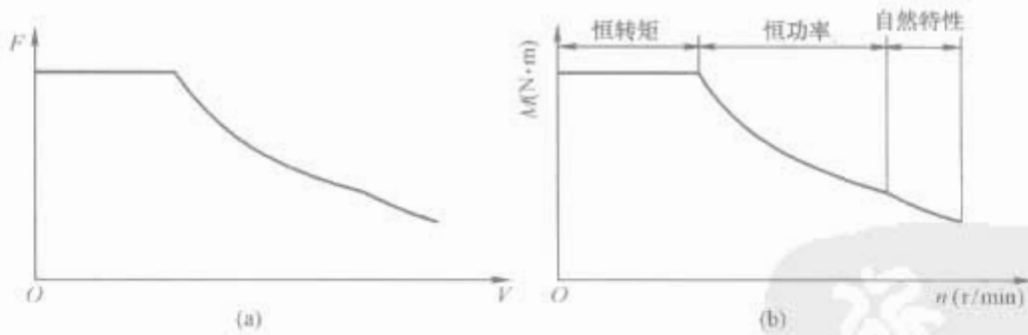


图 2.2-41 交流传动机车或动车牵引特性和异步电动机牵引特性
(a) 机车或动车牵引特性；(b) 异步电动机牵引特性

等，设计总的牵引特性，进而确定单台电动机的基本特性、优化匹配交流传动系统参数，确定主变流器的中间直流环节电压、额定输入/输出电流、最大输入/输出电流，以及牵引电动机和牵引变压器的参数，进而选择开关器件的类型、模块类型等。这是一个基本的系统设计流程。

系统设计包括系统参数设计、计算、选择和验算、系统仿真等，通过系统设计的虚拟平台来实现；主要完成系统性能理论验证、计算以及主要部件的参数选择等任务，并通过仿真优化系统性能。

系统技术的研究除了满足当前应用外，也开展前瞻性的

研究，结合交流传动的技术动态，引导相关部件的发展。将系列化、模块化、通用化的部件和技术，进行简单的裁减和组合，形成可以满足不同需求的成套的系统产品，既能保证应用的灵活性，又能保证产品的可靠性，实现大批量、低成本的商业运作。

(2) 系统仿真。系统仿真可以分成软件仿真和半实物仿真。软件仿真是指电传动系统主电路和控制器均通过软件（如 MATLAB）建模进行的仿真，主要进行原理仿真，用于初步确定系统方案、系统及部件参数等。

半实物仿真是指将实物（硬件）置于仿真系统中，进行

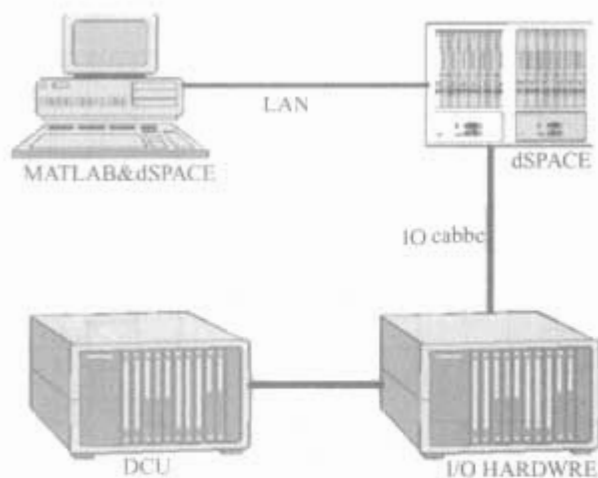


图 2.2-42 交流传动系统中传动控制单元使用实物的半实物仿真系统

实物仿真。半实物仿真一般有两种形式：①控制器用实物，受控对象使用数学模型；②用计算机实现其控制器，受控对象使用实物。仿真系统可以贯穿整个设计过程。

图 2.2-42 为传动控制单元使用实物的仿真系统构成。图中使用 dSPACE 硬件仿真受控对象（牵引变压器+主变流器+三相交流电动机），传动控制单元（DCU）使用实物，实现了交流传动系统的半实物仿真。

图 2.2-43 为受控对象使用实物的仿真系统构成。图中用 2 台 PC 机代替 DCU，受控对象（牵引变压器+主变流器+三相交流电动机）等使用实物，实现了交流传动系统的半实物仿真。

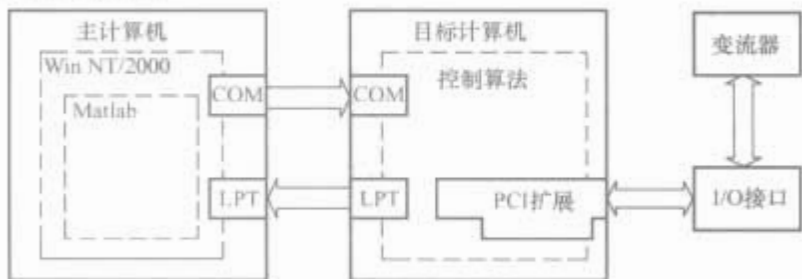


图 2.2-43 交流传动系统中受控对象使用实物的半实物仿真系统

半实物仿真系统可以使设计与试验有机地集合在一起，在设计的中前期就可以做到优化设计、节约调试时间的目的。系统具体功能如下：

- 1) 介入工程设计过程，为用户提供工程方案的预设计，得到最佳工程方案。
- 2) 为系统设计提供有效的工具，加速交流传动系统开发。
- 3) 为部件设计提供高效可靠的辅助平台，缩短设计、调试、改进的周期，节约成本。
- 4) 为设计提供设计后仿真平台。
- 5) 为系统试验提供预试验环境，为整车试验提供设计后仿真等。

3.2.7.2 牵引变压器

牵引变压器一次侧通过主断路器、高压电器、受电弓连接电网，二次侧有多个绕组，如牵引绕组、辅助绕组等。一般牵引变压器还集成了中间直流环节的二次谐振滤波电抗器。连接四象限变流器的牵引绕组的短路阻抗较大，一般为 30%~50%之间。

牵引变压器的关键技术包含电磁场设计及优化、阻抗矩阵设计、温度场计算、油流场计算、磁场屏蔽技术、冷却技术、强度和轻量化设计技术、绝缘技术等，绝缘技术又包含绝缘材料、结构设计和检验手段、绝缘系统的寿命评估方法等。

3.2.7.3 主变流器

主变流器是交流传动系统的核心部件之一，包括四象限变流器、中间直流环节和逆变器几个主要部分。对于直流供电的地铁动车、磁浮列车，主变流器没有四象限变流器，内燃机车则是不控全波整流器，这时主变流器也称牵引逆变器。电力机车和动车组的主变流器最为完整，介于牵引变压器与牵引电动机之间，牵引变压器牵引绕组输出端直接接到主变流器输入端，主变流器输出端直接连接到牵引电动机。四象限变流器的主要功能是完成工频单相交流到恒压直流的变换，能量是可逆的，可在四个象限中运行，同时以功率因数等于 1 为控制目标。中间直流环节的主要功能是储能、滤波、过电压斩波或过电压触发。逆变器输出端接三相交流电动机，主要功能是实现恒压直流到三相变频变压交流的变换。

目前主变流器采用的主开关元件主要有 IGBT、GTO、IPM 和 IGCT，其中 IGBT、GTO 应用最为广泛。GTO 功率大，但其外围电路复杂，开关频率较低，适合于机车转向架控制模式；IGBT 具有开关频率高、外围电路简单的优点，但功率相对小，适用于地铁动车、城轨车辆、动力分散型动车组和单轴控制的电力机车。

主变流器的关键技术包括电力电子器件（IGBT、GTO、IGCT）、开关器件的应用技术、变流技术、EMC（电磁兼容）技术、高效环保的冷却技术、小型轻量化技术、模块化设计技术、元件的保护及安全性技术等。

3.2.7.4 传动控制

传动控制（Drive Control Unit, DCU）的核心任务是，根据司机指令完成对四象限变流器的实时控制、逆变器及交流异步牵引电动机的实时控制和黏着控制，同时具备完整的故障保护、故障诊断功能和轻微故障的自恢复功能。

DCU 的结构形式主要有机箱结构和模块一体化结构，其控制功能可分为 2 层：上层的控制功能实时性要求不高，主要完成变流系统的逻辑、牵引制动特性控制、通信控制和故障诊断、记录等功能；下层为实时控制，主要有四象限整流控制、异步电动机控制、黏着利用控制、中间直流环节控制系统保护等功能。

3.2.7.5 牵引电动机

交流电动机具有体积小和质量小、比功率大、无机械换向器、恒功范围宽、少维护、可在恶劣环境中运行等特点，同时又具有转矩和磁链强耦合、时变、非线性等难于控制的特点。

异步电动机的关键技术包括参数匹配设计技术，轴承、润滑、绝缘技术，材料技术和工艺模具技术等。

3.2.8 系统保护

交流传动系统的保护是一项非常重要的功能。保护措施是为防止部件的直接、间接损坏和保证操作者安全的保护，包括过电流、过电压、超温、部件故障等。不同的保护动作由相应的故障保护诊断系统实施，主要由 DCU 实施。根据故障的严重程度，故障保护诊断系统遵循故障导向安全的原则，采取不同的保护动作。保护的结果是继续运行、限制运行和中断运行。

3.2.9 系统试验

交流传动系统的试验主要有部件试验、系统地面综合试验、整车性能试验、线路试验等四个阶段。

（1）部件试验阶段。主要完成各个部件按照相关标准进行的各项试验，如耐压试验、振动试验、高低温试验、电磁兼容试验等。

(2) 系统地面综合试验。是 DCU 与变流器机组、牵引电动机、网络系统、显示屏、单转向架电传动系统的运行模拟试验, 主要进行和完成模拟故障保护试验、与网络通信试验、牵引变流系统的逻辑控制、牵引/制动特性控制、变流器控制参数匹配等试验。试验主要是实现 DCU 的各项控制功能, 调整控制参数, 匹配电动机特性, 使之满足设计要求, 同时验证其工作的稳定性。

(3) 整车性能试验。包括整车出厂试验和环形铁道安全评估试验、牵引特性试验, 主要进行功能试验、控制参数调整试验等。

(4) 线路试验。主要是机车和动车上线之后的参数调整、安全测试、运行考核, 通过试验不断改进和完善, 直至最终定型, 实现批量生产。

4 辅助电气系统

在电力机车等轨道交通车辆上, 由服务于主电路(而不属于)设备的诸如冷却通风机、电动空气压缩机、变压器油泵、变流器水泵、空调等动力设备组成的电气系统被称为辅助电气系统。通常采用三相异步电动机为负载电动机, 缘于它具有结构简单、应用维护方便的优点。按其提供电源的方式不同分类, 辅助电气系统主要分为旋转劈相机系统和辅助变流器系统两大类。

4.1 旋转劈相机系统

4.1.1 构成

我国交一直传动电力机车的辅助电源大多数为旋转劈相机。由劈相机输出的三相电源供电给机车辅助电路的所有三相异步辅助电动机, 构成了劈相机辅助系统。系统由异步劈相机、三相异步电动机负载及其相应的投切、保护设备组成。从电气线路来说, 就是劈相机的电动相绕组(U相、V相)连接到牵引变压器辅助绕组的一次侧、发电相绕组(W相)则与负载相连。即三相负载的U相电流和V相电流直接从单相电网获得, W相电流则通过异步劈相机获得。

劈相机供电系统有如下特点:

(1) 电压随网压变化而变化, 变化范围一般是额定电压的 0.7~1.2 倍。

(2) 过载能力大, 在电动机启动时能提供较大的启动电流。

(3) 劈相机系统中, 已投入运行的电动机可以协助劈相机供电给未启动的异步电动机。

(4) 只有额定电压和额定负载下输出的三相电压是对称的, 其他情况下输出电压均不对称。

4.1.2 劈相机工作原理

当单相电流通过劈相机单相绕组时, 在电机定、转子之间气隙中产生一交变的脉振磁场。这个脉振磁场可以分解为 2 个幅值相同、方向相反的旋转磁场, 即正序旋转磁场和负序旋转磁场, 故劈相机不能自行启动。当采用某种方式使劈相机转子旋转启动, 由于正序磁场与转子旋转的相对转速较低(约为 0.04%), 而负序磁场与转子旋转的相对转速较高(约为 199.96%), 转子以接近 2 倍的同步转速切割负序磁场, 在转子导条中感应出接近 2 倍于电网频率的电动势和电流。此电流抵消了定子中的负序磁场, 因此, 在气隙中几乎只有正序旋转磁场。它与转子导体内感应的正序电流相互作用, 产生磁场转矩来克服转子的机械阻力矩及转子负序电流产生的电磁阻力矩, 驱使转子沿着正序旋转磁场方向旋转。该正序旋转磁场切割定子三相绕组, 在绕组中感生电动势。

当 W 相绕组电动势高出 W 相端电压时, W 相就向外输出电流, 而正序磁通场需要从 U 相和 V 相输入相应的电流才能保持正序磁通势不变。劈相机正是依靠正序旋转磁场的传递, 把单相电源“劈”成了三相电源。在劈相机的输出端接上三相负载 R 后, 三相负载的 U 相和 V 相电流直接从电网得到, W 相电流由劈相机发电相(W 相)供给。所以劈相机是将单相交流电源“劈”成了三相交流电源, 而本身只输出一相电流的劈相机。劈相机原理如图 2.2-44 所示。

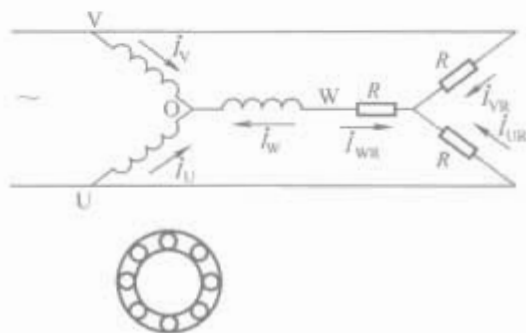


图 2.2-44 劈相机原理图

4.1.3 劈相机启动及运行

在单相电网中, 劈相机本身不能自行启动, 必须依靠启动元件来启动。启动完成后, 劈相机的 U、V 相才能接通单相电网投入工作。

通常劈相机采用启动电阻分相启动, 启动原理如图 2.2-45 所示。

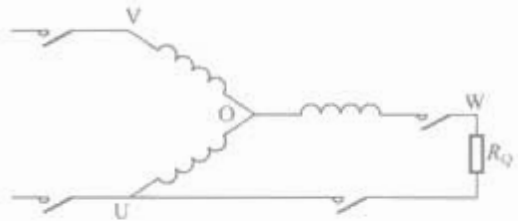


图 2.2-45 劈相机启动原理图

劈相机启动时, W 相绕组串联启动电阻 R_Q 后与 U 相绕组并联, 再与 V 相绕组串联。这时 W 相绕组回路由单相电源供电。在 W 相绕组上获得超前 U 相绕组的电流, 其电流为电感性, V 相绕组流过 W 相和 U 相的合成电流。

电机绕组中正序磁通势在气隙中产生正序旋转磁场, 转子产生启动转矩, 使电机旋转。当转速达到同步转速的 80%~90% (即劈相机最大电磁转矩) 时, 切除启动电阻, 劈相机投入空载运行。

劈相机启动时间不宜过长, 在低网压 (19kV) 下不超过 15s。一般情况下, 连续启动次数不超过 3 次。每 2 次启动时间间隔为 2min, 如果仍不能启动, 则应查明原因, 消除故障后方可启动。

劈相机启动完毕, 逐步接通负载。劈相机的负载是三相异步辅助电动机组。随着机车运行工况的不同, 电动机投入的台数也不同。当负载变动以及单相电网电压在一定范围内波动时, 劈相机的输出功率、三相电压及功率因数亦随之改变, 这将直接影响机车辅助机组可靠性。为了适应实际工作的需要, 在劈相机 U、W 端间并接一定数量的电容来扩展劈相机的容量及改善三相电压的对称性。该电容的数量随着负载的改变而作相应的增减, 具体数值要视在不同机车运行工况下、三相电压的不对称度是否超过有关技术条件的规定而定。一般在牵引工况和制动工况下分别投入不同数量的电容。由于在电动机两相之间并接电容后, 会在合闸瞬间产生较大的瞬时电流, 因此, 对频繁启动的压缩机电动机, 其端子上没有并接电容。

劈相机停止工作前要先断开各电机负载。在运行中要防

止接触网突然断电后，劈相机转速下降到 1200r/min 以后，产生不带起动电阻重新起动劈相机的情况，这样会造成劈相机失速，堵转烧损。

4.1.4 劈相机的设计特点

为了使劈相机能够输出三相对称电压，劈相机的定子绕组需要设计成三相不对称形式，即各相绕组在定子上所占的槽数及槽内的匝数均不相同。为了削弱空间高次谐波磁通势，一般采用分布短距的双层绕组，采用 Y 联结，以避免在绕组内产生环流。

从物理意义上讲，劈相机三相绕组虽然不对称，只要它们三相采用星形接法，三相线电压总是能构成封闭的三角形。因此，三相线电压之和等于零。

因此，劈相机是一种特殊结构、特殊用途的异步电动机，它的设计理论和计算方法与对称电动机不同；设计时需采用劈相机算子、特性阻抗理论为基础的劈相机设计程序及劈相机系统的仿真程序。在 20 世纪 90 年代，对劈相机系统进行了仿真、优化、可靠性及保护的全方位设计，劈相机系统设计已达到较先进和成熟的水平。

4.1.5 劈相机结构

劈相机在结构上与三相鼠笼式异步电动机相似，也是由定子、铸铝转子、端盖、轴承盖等零部件组成。转子为鼠笼式铸铝结构，定子由定子铁心、定子绕组和机座组成。结构见图 2.2-46。定子铁心和转子铁心均采用 0.5mm 冷轧硅钢片叠压而成。定子槽形为半闭口槽，定子绕组为双层、短距、三相不对称绕组，并按一定规律依次嵌入定子槽中、按一定的连接方式连接起来。三相绕组为 Y 联结，转子绕组中的负序电流频率有双倍的电源频率，集肤效应很强，因此，转子槽形采用梨形槽，以削弱转子负序电流的集肤效应。转子为铸铝鼠笼形结构，导条、端环、叶片、平衡柱用 AL99.5 铝与铁心一次铸成，热套在转轴上。

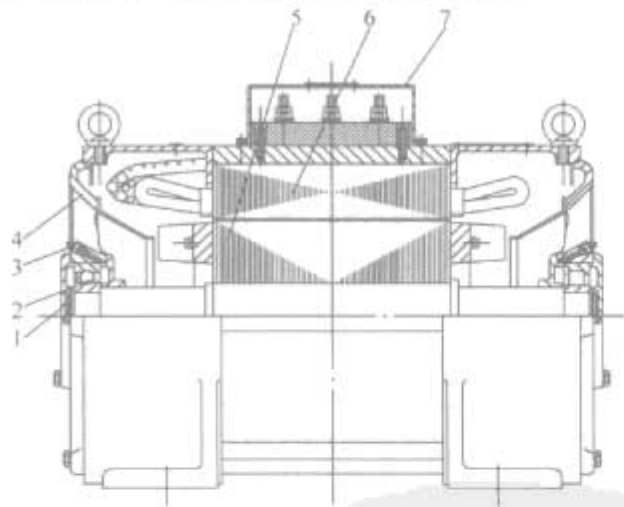


图 2.2-46 劈相机结构
1—轴承盖；2—轴承；3—油杯；4—端盖；
5—转子；6—定子；7—接线盒

4.1.6 劈相机供电的辅助电动机工作特点

劈相机供电的辅助电动机在性能上要满足三相电压不平衡、不对称电压起动、耐振等特殊要求。由于安装在车体内，空间尺寸要求小、质量也要求小，它与普通异步电动机的运行方式不同。它不仅是一台单独运行的电动机，而且要与多台并联运行的电动机一起工作。它要在高低电压波动下及机车各种运行工况下正常起动和运行。因此，劈相机供电的辅助电动机具有以下工作特点：

(1) 具有较高的最大转矩和最小转矩倍数。辅助电动机在劈相机三相不对称输出、电压在 0.7~1.2 倍额定电压下波动的恶劣条件下工作，是一组并联运行的电动机组。在起

动过程中，当已被起动的电动机工作在其电磁转矩稳定区内，它帮助劈相机起动其他电动机。如果这台电动机协同劈相机起动其他电动机时，它的电磁转矩减小，当小于负载转矩时，这台电动机被减速，当转速减至最大转矩的转速时仍小于负载转矩，该台电动机就会被颠覆，发生堵转事故。此时，电动机的 W 相电流不但不能帮助劈相机起动电动机，反而要从劈相机发电相侧输入电流，和其他正在起动的电动机一起分享劈相机的输入电流。如果运行着的所有电动机都发生这种电磁转矩的颠覆，整个系统将被颠覆而无法稳定运行。因此，电动机的最大电磁转矩倍数要比普通 Y 系列三相异步电动机取得高。同时，提高起动过程的最小转矩，可确保电动机在低网压下平滑起动，避免低速爬行而烧毁电动机，以增加电动机的使用可靠性。

(2) 有较大的温升裕度。早期电力机车辅助电动机采用 B 级绝缘，20 世纪 90 年代的新产品为 F 级绝缘。SS₇ 型机车辅助电动机采用 H 级绝缘，有较大的温升裕度，有利于延缓绝缘老化、提高电动机的使用寿命和可靠性。

(3) 体积和质量小。随着设计水平提高，在保证电动机耐振等强度要求下，辅助电动机的质量大大减小。例如：SS₃ 型机车辅助机总功率为 189kW，总质量为 2210kg，单位功率的质量为 11.69kg/kW；而 SS₇ 型机车辅机总功率为 255kW，总质量为 1946kg，单位功率的质量为 6.85kg/kW，质量减小 41.4%。

(4) 电动机功率比实际轴功率大。在高、低电压下，电动机电流的不对称度达 30% 以上。如果电动机的功率仍按实际负载选取，在高、低电压下的某一相（如 V 相）将长期处于严重过载下运行，电动机寿命将大大缩短。因此，电动机功率的选择要按实际轴功率及劈相机系统高、低电压工况的实际损耗来确定，以满足电动机实际温升发热要求。各型辅助电动机功率与实际轴功率的对照关系见表 2.2-25。

表 2.2-25 辅助电动机功率与实际轴功率
的对照关系和辅助机械的
种类与作用举例

辅机型号及名称	实际轴功率 (kW)	电动机功率 (kW)	辅助机械	作用
JD301 牵引风机电动机	22	37	离心式风机	牵引电动机通风
JD313 牵引风机电动机	35	60	离心式风机	牵引电动机通风
JD302 压缩机电动机	22	37	空气压缩机	气动机械的动力
JD321 压缩机电动机	22	30	空气压缩机	气动机械的动力
JD304 压缩机电动机	18.5	22	空气压缩机	气动机械的动力
JD305 制动风机电动机	20	30	轴流风机	冷却制动电阻
JBT61-2* 制动风机电动机	9	14	轴流风机	冷却制动电阻
TZTF5* 制动风机电动机	14	22	轴流风机	冷却制动电阻
JD305 制动风机电动机	21	30	轴流风机	冷却制动电阻
JT31-2LA* 变压器风机电动机	9	14	轴流、混流式风机	主变压器油散热器冷却
TZTF6.0G* 变压器风机电动机	11	16	轴流、混流式风机	主变压器冷却

续表				
辅机型号及名称	实际轴功率 (kW)	电动机功率 (kW)	辅助机械	作用
JD314 变压器风机电动机	20	30	轴流、混流式风机	主变压器冷却
QB-25/16-2.2 ^① 变压器油泵电动机		2.2	油泵	主变压器油循环
QB80/20-13D/T ^① 变压器油泵电动机	7	10	油泵	主变压器油循环
Y100L-2 ^① 硅整流风机电动机	2.2	3	轴流风机	硅整流器冷却
T455 ^① 硅整流风机电动机	2.2	4	轴流风机	硅整流器冷却
JD913 硅整流风机电动机	3	5.5	轴流风机	硅整流器冷却
JD315 硅整流风机电动机	3.2	4.5	轴流风机	硅整流器冷却

① 表示型号为风机或驱动机械型号。其中压缩机频繁启动为断续工作制；风机电动机为连续工作制。

4.1.7 劈相机辅助系统的冗余

劈相机在机车辅助系统中是关键部件之一，一旦出现故障将造成机车机破（即停驶），影响铁路的安全运行。因此，从可靠性出发，按并联冗余系统设计，每节车有 2 台劈相机并联运行，当一台劈相机出现故障，另一台劈相机就向全部辅助电动机提供电能。

4.1.8 劈相机辅助系统的保护

辅助系统的保护是指劈相机、辅助电动机及其辅助系统的故障保护，有系统的过电压吸收、过电流、接地及辅助电动机的过载保护。

(1) 过电压保护。采用跨接在辅助绕组上的 RC 支路的过电压吸收装置。

(2) 过电流保护。采用电流互感器、电流继电器检测过载电流和执行器件。当辅助绕组发生过载、短路时，其电流值超过整定值，继电器动作输出信号，机车主断路器分断并显示信号。

(3) 接地保护。辅助系统设置了有源接地保护系统，接在辅助绕组的某一端。它由开关、限流电阻、滤波电容、接地继电器组成，其电路中串联有 DC110V 电源，然后接地形成保护电路。当辅助系统其他点接地时，继电器动作，机车主断路器分断并显示信号。

(4) 辅助电动机过载保护。劈相机、通风电动机等辅助电动机都装有过电流保护装置，大致分为两大类：

1) 电子辅机保护装置。它是一个电子装置，当出现辅助电动机发生走单相、短路、堵转等故障时，由负载电路中的电流互感器检测过载电流信号，经过保护电子插件按其安一秒保护特性，推动装置内相应继电器动作，切断相应辅机的输入接触器，起到保护作用。如果接触器未能按期切断故障，则二级保护信号输出，使机车主断路器分断并显示信号。

2) 采用自动开关作为保护器具。各个负载电动机的输入端接入三相自动开关，当出现走单相、短路、堵转等故障引起过电流时，相应的三相自动开关将进行保护动作切断故障，并输出故障显示信号。自动开关的保护有电磁脱扣和热脱扣两种方式。前者用于保护短路故障，一旦发生短路，在 0.5s 内保护动作；后者用于过电流保护，保护动作时间与

故障电流大小有关，按安一秒保护特性动作。自动开关保护性脱扣后需间隔 2~3min 后才能人工恢复接通。

(5) 其他。有的电力机车辅助电路中设置零电压保护电路，用于电网失电后重合闸送电的保护；还设有安全高压室的门联锁保护装置，保证高压带电状态下的锁闭，这是机车整体安全所需的保护。

4.2 辅助变流器系统

4.2.1 电路构成及特点

借助电力电子技术，采用 GTO 或 IGBT 等电力电子元件构成，从单相（或者主变流器中间直流环节）输入电源，经过辅助变流器，输出三相对称可变压变频的电源，供电给辅助三相异步电动机构成的辅助系统，称为辅助变流器系统。

4.2.1.1 主要特点

- (1) 三相输出电压值对称稳定。
- (2) 输出的电压波形高次谐波含量高，具有脉宽调制的脉冲电压，对电机绝缘材料要求特殊。
- (3) 具有变压变频功能而节能。
- (4) 体积和质量小，采用四象限变流器，功率因数接近于 1，效率 0.9 以上。
- (5) 装有计算机网卡，可以和列车网络总线连接。具有进行自动化控制、显示和诊断功能。

4.2.1.2 系统构成

常见的辅助变流器系统原理如图 2.2-47 所示。由牵引变压器辅助绕组通过开关输入电源，经过四象限变流器、中间直流环节、逆变器、负载分配柜输出给负载三相异步电动机。

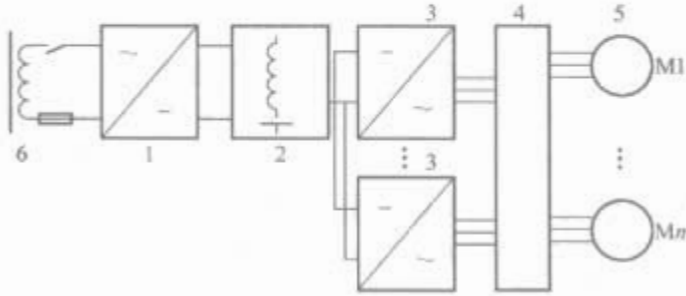


图 2.2-47 辅助变流器系统原理图
1—四象限变流器；2—中间直流环节（包括滤波电抗器）；
3—逆变器；4—负载分配柜；5—辅助电动机 M1~Mn；
6—牵引变压器辅助绕组

图 2.2-48 所示为 TGF5 型辅助变流器电路原理，它用于 DDJ₁ 型动力车。采用 1 台整流器、3 台逆变器组成的方式，从牵引变压器辅助绕组输入交流 860V 电源，由整流器、滤波电抗器、逆变器、控制电路几部分组成。逆变器采用了 IGBT 作为开关器件，并围绕它设置了较完善的保护措施，如过电压保护、过电流保护、贯穿短路保护等，使该种变流器有较高的工作可靠性。该辅助系统用在车上后，其质量比原有同功率的劈相机辅助系统的质量减少了 1t，效果非常明显。

随着电力电子应用技术的发展，辅助变流器可以直接从主变流器的中间直流环节得到，如图 2.2-49 所示。HXD₁ 型交流传动机车和 CHR₃ 高速电动车组上均采用这种电路结构。其优点是省去了辅助整流器和中间环节，设备结构更加简化和体积缩小，节省了成本；带来的困难是要合理解决主、辅变流器中间直流环节的共用问题，可靠性要求更高，即在技术水平上更上了一个档次。

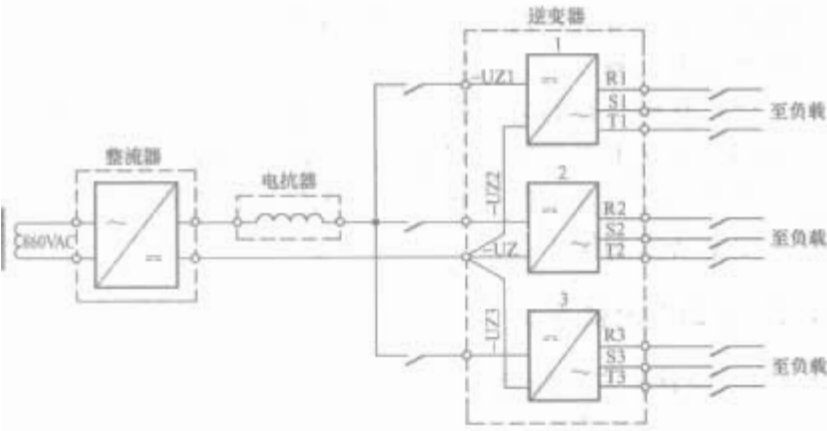


图 2.2-48 TGF5 型辅助变流器电路原理图

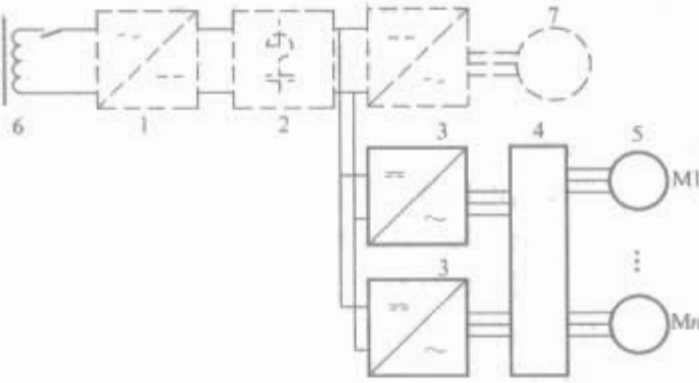


图 2.2-49 从主变流器中间直流环节取电的辅助系统原理图

1—主变流器的四象限变流器；2—主变流器的中间直流环节；3—逆变器；4—辅助电动机负载分配器；5—辅助电动机；6—牵引变压器的牵引绕组；7—异步牵引电动机

4.2.2 辅助系统的负载分配

通常辅助电动机的负载性质与机车的工况及投入的设备负载性质有关，而且为了与辅助变流器的容量相匹配，往往是负载分组连接在不同的辅助变流器电源组上，通过控制系统的负载分配环节（微机控制、低压电器柜）来控制：

- (1) 负载有序投入和切换控制。按照机车不同工况和辅助机械的负载的投入和切换控制逻辑要求。
- (2) 故障转换控制。当 1 套电源故障时保证机车仍可正常运行；2 套电源都故障时降功率运行。

4.3 其他辅助系统

4.3.1 柴油发电机组系统

内燃机车和动车组由柴油辅助发电机发出三相（或直流）电源，供电给机车和动车上辅助机械的三相异步电动机（或直流电机），构成辅助电气系统。

(1) 直流辅助系统。在交一直传动内燃机车上柴油机起动采用直流电动机，用蓄电池供电通过直流电动机起动柴油机，起动完成后柴油机反之带动它作为他励（额定功率为 80kW）辅助发电机，发出 110V 直流电供蓄电池充电及空气压缩机、油泵电动机等辅助机用电。DF₄~DF₁₁ 型机车上均采用这种辅助电气系统。

(2) 辅助柴油发电机、辅助交流电机系统。采用与主电路系统单独的辅助柴油机发电机，三相同步发电机发出稳压稳频的三相交流电源供应辅助异步电动机的电源。

4.3.2 电力机车、动车组上的其他辅助系统

4.3.2.1 直流电动机系统

直流电动机系统是由交流相控整流滤波后供给直流辅助电动机的电气系统。其基本结构是由牵引变压器的辅助绕组接到单相半控整流桥整流成直流，滤波并稳压后的直流电源驱动辅助电动机工作，在进口 6G 型机车上采用。该电源因电

子控制稳压，有电压恒定的优点；但是由于直流辅助电动机的换向器与炭刷磨损等问题，给维修带来麻烦。

4.3.2.2 静止分相系统

采用牵引变压器单相绕组 U、V 作为电动二相和发电 W 相，通过电感、电容分别为滞后相、超前相与电网电源为一相组成 U、V、W 三相电源，供给三相异步电动机、辅助压缩机、电动通风机等，并通过接触器分组投入，被称为静止分相的辅助系统，在进口 6G101-102 型和 8G 型机车上采用的。

4.3.2.3 单相换向器和单相异步电机系统

以牵引变压器辅助绕组为电源，不经任何处理就作为单相电源，而选择单相换向器电机作为辅机驱动。虽电源很简单，但是单相换向器电机要考虑网压波动的有限性，以及单相换向器电机本身容量和体积要增大不少，因此要综合考虑设计。这种辅助电气系统在日本的电动车组上广泛应用。

4.4 列车供电系统

4.4.1 发电列车供电

在客运列车编组中设置一节专用柴油发电车车厢，由 2 套 300~400kW 的柴油机三相同步发电机组成，平时其中一台冗余，发出的三相 380V 电源通过电源插头向各客车车辆输出三相电源，供每车上的空调、取暖、照明、蓄电池充电等需要。

4.4.2 电力机车列车供电

在铁道电气化区段，由于机车上可以通过电网、受电弓引入了电源，因此在机车牵引变压器的二次侧设置 AC860V 的列车供电绕组，连接到半控整流桥进行整流、滤波后变成 DC600V 稳定电源，通过电源连接器，向各车辆输出。各车辆均设置 IGBT 静止逆变器将其变为三相 380V 电源，供辅助机组用电。这种电力机车列车供电系统，成功取代了原发电车，节省了客车资源和人工费用，而且噪声小、无污染、节能。

4.4.2.1 系统的构成

供电系统采用机车集中整流、客车分散逆变的供电方式，分别向列车提供 2 路 DC600V 电源，以满足客车空调、采暖、照明等电器的用电需要。为确保列车正常供电，机车上设置 2 套供电绕组及整流装置，输出功率为 2×400kW，可同时工作。冗余设计的目的是提高系统可靠性。

图 2.2-50 中连接器及其电源干线是双路布置的，后面客车辅助逆变器的负载是按照客车奇偶数分别连接到不同的电源干线上的。这样布置的目的是在电源故障时保障供电电源的处理和转换方便。

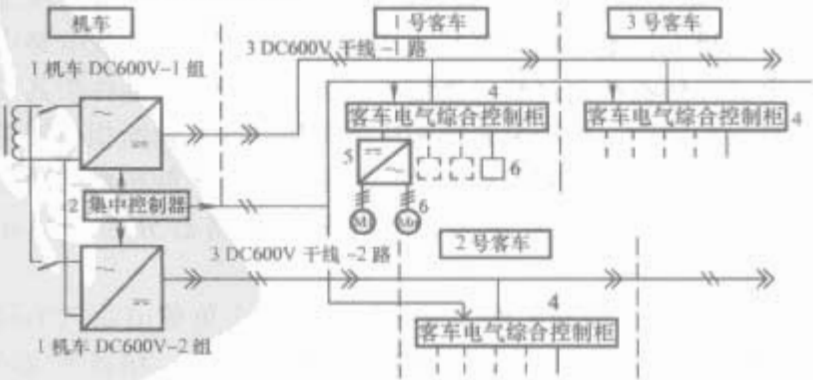


图 2.2-50 电力机车向列车供电系统的示意图

1—机车 DC600V 供电柜（1、2 组）；2—集中控制器；3—供电干线（1、2 路）；4—客车电气综合柜；5—辅助逆变器；6—辅助电动机及其辅助负载

4.4.2.2 电源基本功能

电源具有整流稳压, 供电电量、电压、电流显示, 直流侧电容滤波、故障显示和交、直流过电压保护, 交、直流过电流保护, 供电干线接地保护等功能。

4.4.3 内燃机车列车供电

由于电力机车列车供电的成功启示, 促使内燃机车的列车供电系统也开始逐渐应用。在 DF₁₁ 型机车上, 采用辅助柴油发电机发出三相交流电, 通过机车上专设三相桥式整流装置整流变成 DC600V 电源, 然后通过电源连接器送至客车的电源干线上, 在客车上再经过辅助逆变器供给空调等设备的用电。其供电系统示意图如图 2.2-51 所示。图中连接器及其电源干线实际也与电力机车供电方式一样, 按双路布置输出到客车, 后面客车辅助逆变器的负载是按照客车奇偶数分别连接到不同的电源干线上。这样布置的目的也是便于故障后的处理。

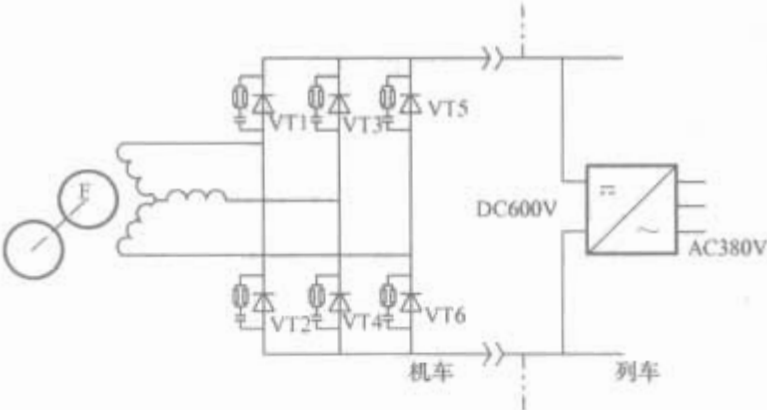


图 2.2-51 内燃机车向列车供电系统示意图
列车供电系统主要技术参数见表 2.2-26。

表 2.2-26 列车供电系统主要技术参数

类型	结构特点	主要技术参数	应用特点
发电车	设计柴油发电机 2~3 套, 装于客运列车的发电车上	每 300~400kW 输入三相四线 380V 供应列车用电	有发电车的客运列车
电力机车供电	机车变压器取电, 单相半控桥集中整流输出, 列车上分散逆变	每套 400kW, 共 2 套, 输入 AC860V, 输出 DC600V, 2×670A	取消发电车, 用于 SS _{7C} 、SS ₈ 、SS ₉ 等电力机车牵引列车
内燃机车供电	辅助柴油发电机组, 三相整流桥, 取消发电机	TGF24 型号, 480kW, DC600V, 800A	DF _{11G} 型内燃机车取消发电车

5 控制系统

5.1 控制系统的任务

控制系统是机车的神经系统, 它直接关系到主电路的能力能否充分发挥以及运行的安全性。控制系统的主要任务是调速和保护。调速包括起动、加速和减速的全过程, 它包括牵引性能控制和电制动性能控制, 以便充分发挥机车的牵引力和电制动力, 保护相关运行的安全和防止设备的损坏。常用的保护有牵引电动机电枢过电压保护、牵引电动机过电流保护、励磁过电流保护、二次侧整流桥过电流保护、一次侧过电流保护、网压过电压和欠电压保护、小齿轮弛缓保护、

空转/滑行保护以及超速保护等。
控制系统还有其他的任务。在不同车型上, 这些任务可以有所有同, 但所有车型都需执行一定的控制逻辑来控制相应设备, 如受电弓的升降、主断路器的分合、牵引和电制动间的互锁等。有的车上有功率因数补偿装置, 需根据无功功率的大小来控制它的投切。电力机车还有过分相区的问题, 采用自动过分相装置可以减轻司机劳动强度, 提高运行可靠性。

机车牵引过程中会造成前端减载、后端加载。机械上采用低牵引拉杆可以减少这种轴重转移, 在电气上也可以对轴重转移进行补偿。如 SS₈ 机车上, 在额定电流以下不进行轴重转移补偿, 额定电流至最大允许电流之间按线性补偿, 在最大允许电流时前转向架减载 4%, 后转向架增载 4%。
机车控制有转向架控制和单轴控制之分。在转向架控制时同一转向架上的几个电动机按相同指令控制; 在单轴控制时, 同一转向架上的几个电动机控制指令可以不同。单轴控制有利于每轴功率的充分发挥, 但增加了控制的复杂性。在交一直传动的机车上一般都采用转向架控制; 而在交流传动的机车上, 由于轮径差异对电动机特性影响大, 除了传统的转向架控制外, 已在向单轴控制方向发展。国内单轴控制的交流传动机车已有应用。

5.2 调速方法

控制系统按照司机的意图对机车进行速度和牵引力（电制动力）调节。司机通过操纵司机控制器发出向前、向后、牵引、制动命令以及级位指令, 每个级位在交一直传动机车上代表一定的电流或速度; 在交流传动机车上代表一定的牵引力或转矩。

5.2.1 交一直传动的调速

交一直传动的调速公式见本章式 (2.2-71)。
调整电动机转速 n 可有两种方法: ①调节加在电枢上的整流电压, 直至达到电动机额定电压为止; ②保持电枢电压恒定进行磁场削弱, 以减少 Φ 来提高转速 n 。

5.2.1.1 调速范围

为使机车安全运行, 机车牵引时的调速范围受到下列 5 种工况的限制 (见图 2.2-52):

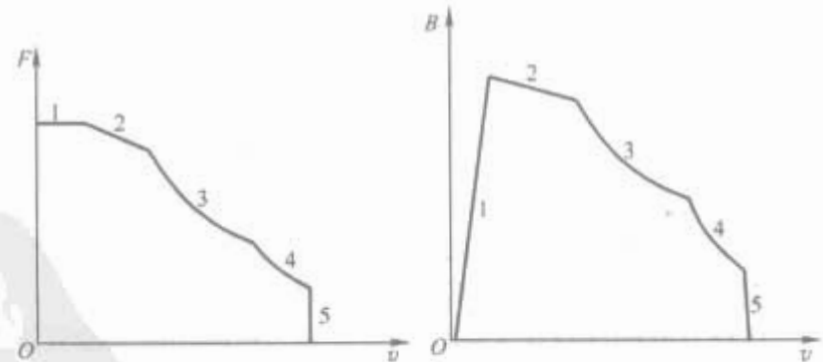


图 2.2-52 牵引工况
调速范围

图 2.2-53 制动工况
调速范围

- 1) 牵引电动机最大允许电流限制 (图 2.2-52 中曲线 1)。
 - 2) 机车黏着限制 (图 2.2-52 中曲线 2)。
 - 3) 牵引电动机额定电压时恒功率限制 (图 2.2-52 中曲线 3)。
 - 4) 机车高速时牵引电动机的换向限制, 又称最深磁场削弱限制 (图 2.2-52 中曲线 4)。
 - 5) 机车最高允许运行速度限制 (图 2.2-52 中曲线 5)。
- 在电制动时, 机车调速范围也受到 5 种工况的限制 (见

图 2.2-53)：

- 1) 牵引电动机最大允许的励磁电流限制 (图 2.2-53 中曲线 1)。
- 2) 机车黏着限制 (图 2.2-53 中曲线 2)。
- 3) 机车最大制动功率限制 (图 2.2-53 中曲线 3)。
- 4) 牵引电动机高速换向限制 (图 2.2-53 中曲线 4)。
- 5) 机车最高允许运行速度限制 (图 2.2-53 中曲线 5)。

5.2.1.2 端电压 U 调节

(1) 调压开关的调速方式。这种方式是司机通过司机控制器操纵相关电器，控制伺服电动机，驱动调压开关来改变牵引变压器输出接法，使整流器输出电压从接近零电压变换到全电压的调压，实现牵引电动机的调速。这种调压方式的运行特性如图 2.2-54 所示，图中数字表示调压开关的极位。

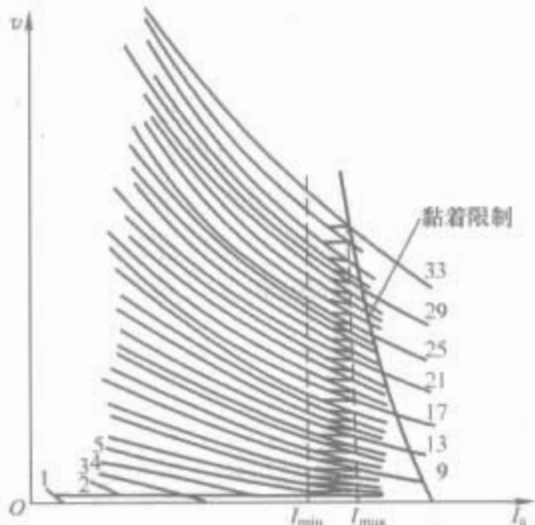


图 2.2-54 调压开关调压的运行特性

这种方式的缺点是起动过程中牵引电动机电流在 I_{\max} 与 I_{\min} 之间来回摆动，黏着条件不能充分利用，牵引不太平稳。

(2) 晶闸管连续相控进行调压的调速方式。这种方式是司机通过指令控制器、电子控制装置，控制晶闸管的触发脉冲相位角来调整加于牵引电动机的直流电压，从而达到调速的目的。实现这种控制方式的控制框图如图 2.2-55 所示。由图可知，司机通过司机控制器给出级位指令，由框 1 将司机的级位指令换算成控制器的电流指令。此函数关系可以是司机给定级位的单调线性函数，即 $I = kn$ (k 是比例系数， n 是司机级位)，如 SS_3 电力机车，仅实现恒流控制；也可以是与司机给定级位及机车速度相关的函数量，即 $I = f(n, v)$ ，其曲线见图 2.2-55 框 1。8K 机车就采用这种控制方法，它可实现恒流和准恒速控制。与框 2、框 12 一起在框 3 综合，选出最小值，作为电流调节器框 5 的电流指令。框 5 的输出值与框 6 再经最小值选择器框 3 选择，成为晶闸管可控整流桥相移脉冲控制电压 U_c 。 U_{A1} 和 U_{A2} 是正比于网压的两个不同直流偏置电压。选择 U_{A1} 和 U_{A2} 的值可以保证第 1 段桥的晶闸管脉冲生成环节 (框 7 和框 9 组成) 在相移脉冲控制电压 U_c 较低时产生触发脉冲，并随着 U_c 的增高，触发脉冲从 180° 移向 0° 。待第 1 段桥触发脉冲达到 0° 之后，由框 8 和框 9 组成第 2 段桥晶闸管脉冲生成环节开始产生触发脉冲，并随着 U_c 继续增高再使第 2 段桥晶闸管脉冲也由 180° 移向 0° (即为全开放)。为了使两段桥触发脉冲衔接工作完好，必须合理选择 U_{A1} 和 U_{A2} 的数值及框 7 与框 8 的参数。

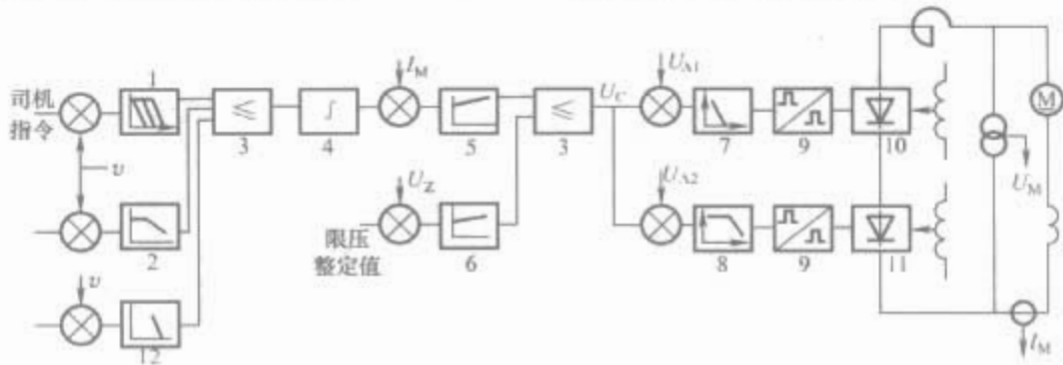


图 2.2-55 牵引工况相控调压方式电子控制框图

v —机车速度； I_M —牵引电动机电流； U_M —牵引电动机电压； U_{A1} 、 U_{A2} —偏置电压；1—“特性控制”函数发生器；2—“最大电机电流”和“黏着限制”函数发生器；3—最小值选择器；4—延时环节；5—电流调节器环节；6—电压调节器环节；7—第 1 段桥比例放大器；8—第 2 段桥比例放大器；9—脉冲生成及放大环节；10—第 1 段半控桥；11—第 2 段半控桥；12—电流—速度限制曲线函数发生器

框 2 是牵引电动机最大电流及“黏着限制”函数发生器，保证电动机电流在低速时始终在规定值以下运行。框 12 是机车高速时电动机高速换向限制所需要。

这种方式的优点在于起动平稳，易于将起动电流始终维持在黏着条件允许的最大值附近，使黏着条件得到充分利用；由于晶闸管控制时间响应较快，能与灵敏的空转保护装置良好配合，保证其性能优异；采用无级平滑调速后，使机车牵引特性成为一个遍布机车调速范围的平面特性，即任何一点都可以作为机车运行的工作点。

(3) 内燃机车电传动调速。调节司机手柄挡位可以改变柴油机转速，亦即调节主发电机的转速和输出功率。当柴油机转速一定时，还可以调节主发电机的励磁来改变主发电机的输出电压，通过整流，也就改变了加在牵引电动机电枢上的电压，从而实现了调速。

5.2.1.3 调节主极磁通 Φ

调节主极磁通主要靠调节主极磁通势实现。目前普遍采

用的办法是，在主极绕组上并联分路电阻，使电枢电流一部分流经分路电阻，从而减小励磁电流、磁通势和磁通。图 2.2-56 是这种调节方法的示意图。用图示的电路可以实现 3 级磁场削弱，如分路电阻 R_1 、 R_2 用开关 1 和 2 可实现 3 种组合，即 R_1 、 R_2 、 $R_1 // R_2$ 。

由于磁通势、磁通只能减小，这种调速方式是一种基速以上的调速方式。

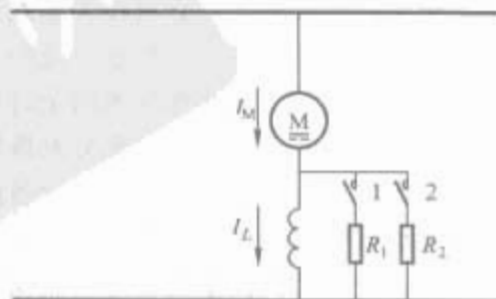


图 2.2-56 用分路电阻削磁示意图

对于采用串励牵引电动机的交—直流传动电力机车，还有一种采用晶闸管的无级磁场削弱电路，如图 2.2-57 所示。图中 G2 桥完全开放后，利用控制 VT1 和 VT2 在每周期的导通时间来控制磁场电流的分程度。VT1 和 VT2 分别在交流的正负半周内导通。如果时间为 T_1 ，电源半周期的时间为 T ，则励磁率 $\beta = (T - T_1) / T$ 。当采用他励或复励直流电动机作为牵引电动机时，可以用控制他励绕组的电流来实现磁场削弱的目的。

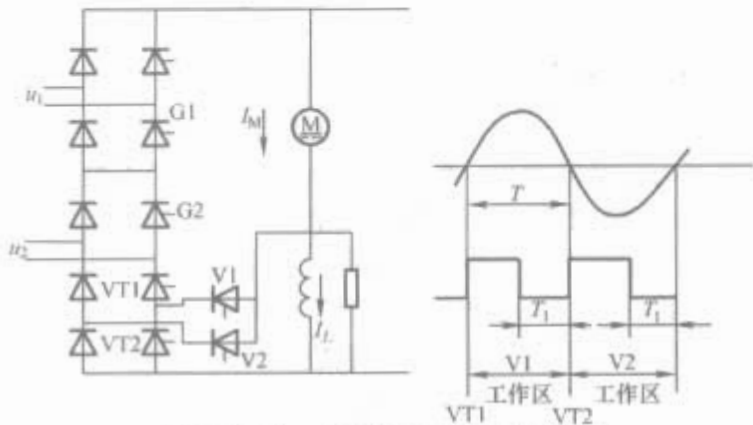


图 2.2-57 无级磁场削弱原理图

5.2.2 电动机电压和电流的自动调节系统

为实现晶闸管连续相位控制的功能，提高机车的运行性能，现代机车上常装有自动调节功能的电子控制系统。在电力机车上最常用的自动调节系统是恒流调节系统和恒速调节系统。恒流调节系统能保证机车运行过程中牵引电动机电流恒定不变；但一旦轮轨黏着破坏，轮子飞速，恒流控制系统将使牵引电动机中电流不变 ($\Delta I / \Delta U = 0$)，不利于黏着恢复。

所以通常恒流调节系统与灵敏的防空转系统共同工作，一旦空转发生，将降低电流给定的指令，从而降低牵引电动机的电流，使之恢复黏着，以补救恒流调节系统的不足。恒速调节系统对坡道起伏、阻力多变的线路会引起较大的牵引力的变化，以致冲击过大，而十分准确的恒速控制也无太大的必要，故一般采用准恒速调节系统实现对机车的控制；而且准恒速调节系统往往与恒流调节系统有机地结合起来，用一个司机指令来控制机车。因此，我国相控机车采用所谓“特性控制”的控制方法，其牵引和制动工况的特性曲线分别如图 2.2-58 和图 2.2-59 所示，图中数字表示牵引或控制手柄的极位。为了操作方便，这些函数关系都为线性函数。

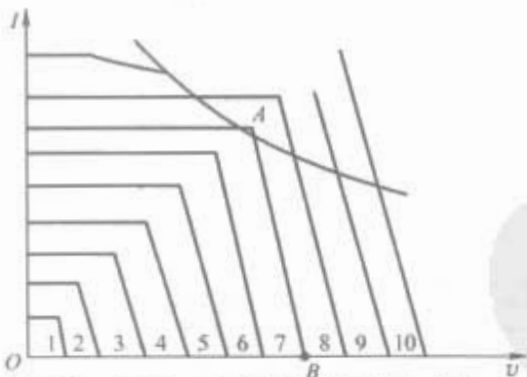


图 2.2-58 牵引工况“特性控制”的运行特性

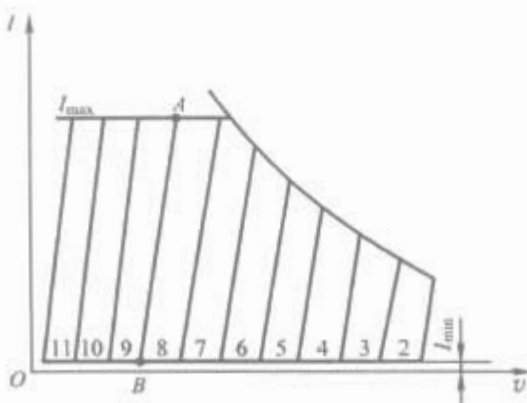


图 2.2-59 制动工况“特性控制”的运行特性

对牵引工况，函数关系式为

$$I \leq \begin{cases} An \\ B(Cn - v) \end{cases} \quad (2.2-91)$$

对于制动工况，函数关系式为

$$I \leq \begin{cases} an \\ bv - c(n - 1) \end{cases} \quad (2.2-92)$$

式中： n 为级位； I 为牵引电动机的电流； v 为机车速度； A 、 B 、 C 及 a 、 b 、 c 为设定常数。

设计时，同一级的最高速度和最低速度差一般在 10km/h 左右。

5.2.3 交流传动调速

三相交流传动电力机车的控制应满足牵引力/制动力—速度特性的要求，使机车的传动和控制系统具有最佳的动态性能，保证列车运行的安全和舒适，充分利用设备能力，降低能耗。为此，在机车传动系统中，通过对主变流器的适当控制，使电动机在零速度到规定基速（如额定速度）的范围内，以接近恒定的磁通工作；而在基速以上的速度范围内，以固定的端电压工作。通常称这两种工作状态为恒转矩起动和恒功率运行。图 2.2-60 表示按上述要求进行控制时牵引电动机端电压及其他有关参数的变化情况。

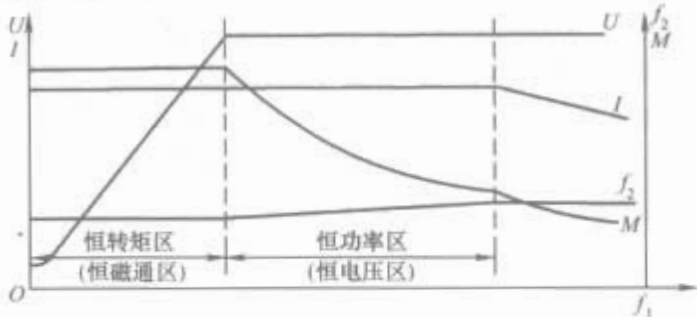


图 2.2-60 变频控制异步电动机的电压 U 、电流 I 、转差频率 f_2 、转矩 M 与定子频率 f_1 的关系

关于四象限变流器和逆变器具体的控制方法，详见本书第 3 章。

5.3 功率因数补偿装置的控制

在直传动的电力机车上，为补偿功率因数，吸收谐波电流，车上装有 LC 组成的静止功率因数补偿装置。功率因数补偿装置以晶闸管静止开关来控制其投入与切除，两个晶闸管各在相应的半周内导通。功率因数补偿装置可分数组，用电子装置对机车产生的无功功率进行实时计算。无功功率大时，多投几组；无功功率小时，少投几组，甚至全部切除，以此来控制机车功率因数。在采用静止开关投入时，必须保证外加电源电压 U 和电容器上电压 U_c 相等的那一瞬时才给晶闸管触发脉冲，这样才能实现无电流冲击的无过渡过程投入。这种工作方式对电容器工作有利，切除时只要取消晶闸管的触发脉冲，自然会在电流为零时切除 LC 装置。采用这种功率因数补偿装置的缺点是增加机车质量，而且只能分级控制。优点是就地补偿且效果较好，对稳定供电网压也有好处。

在交流传动电力机车上，用适当的调制方式，可使四象限变流器的输入电压具有合适的大小和相位，保证流过接触网的电流为正弦波，并与网压同相，从而使电网功率因数约等于 1，降低对信号和通信的干扰。因而交流传动的电力机车上无需另设功率因数补偿装置。

5.4 黏着及黏着利用控制

5.4.1 黏着的基本概念

两个具有一定表面粗糙度的物体，在一定压力下相互接

触，像齿轮那样处于啮合并传递作用力的一种物理状态或物理现象称为黏着。

黏着状态下所传递的作用力称为黏着力，也就是静摩擦力。从传力开始，到两粗糙的表面彼此“啮入”而进入黏着状态，其间因弹性变形而产生少许相对移动，即所谓“蠕滑”现象。随着黏着力的增大，当达到最大黏着力时，轮轨表面的“啮入状态”突然破坏，在此瞬间产生空转导致所传递的力迅速降低；当低到某个值后，轮轨表面又立即恢复黏着状态。在轮轨黏着状态破坏前，由黏着确定的轮周牵引力（其极限值接近最大静摩擦力）称为黏着牵引力。

黏着因数是轮轨间能够实现的机车最大黏着牵引力与机车黏着重量之比值。黏着因数常用 μ 表示， $\mu = F/W$ 。式中 F 是黏着牵引力（轮周牵引力）， W 为黏着重量（机车轴重）。黏着因数是一个受多种因数影响的变量，机车最大的黏着因数 μ_{\max} 接近于轮轨间的最大静摩擦因数。图 2.2-61 给出了不同路况时的黏着特性曲线，图中蠕滑速度 v_s 定义为

$$v_s = v_R - v_T \tag{2.2-93}$$

式中： v_R 是车轮线速度； v_T 是车体线速度。

从图 2.2-61 中可以看到，虽然不同路况下黏着特性曲线互不相同，但在各种路况下都存在相应的黏着因数最大值 μ_{\max} 。设黏着因数最大值 μ_{\max} 处的蠕滑速度为 $v_{s\text{opt}}$ ，称 $(v_{s\text{opt}}, \mu_{\max})$ 为黏着峰值点，如图中的 A、B 点。显然路况不同，相应的黏着峰值点也不同，并且只有当黏着因数取最大值 μ_{\max} 时，能够传递的牵引力才将达到最大值。定义 η 黏着利用率，即

$$\eta = \mu / \mu_{\max} \tag{2.2-94}$$

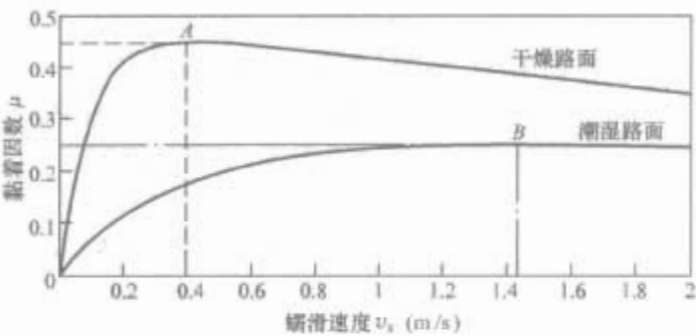


图 2.2-61 不同路况时的黏着特性曲线

5.4.2 黏着利用

在轮轨交通运输中，机车动轮和钢轨之间的黏着力是驱动机车运行的最终动力。轮轨之间所能提供的最大黏着力受到各种自然条件的影响，机车实际发挥黏着力的大小取决于机车的黏着利用率。良好的黏着利用不仅可以有效地提高机车的加速性能，缩短制动距离，改善乘车舒适性，而且还能显著地减少机车的空转和滑行，避免轮轨严重擦伤，延长轮轨的使用寿命。由于良好黏着利用对机车所具有的重要作用，近几十年来，特别是随着交流传动技术的应用和高速列车、重载货运列车的发展，黏着利用的研究和应用越来越受到人们的重视。

然而，提高机车黏着利用是一个系统工作，它需要从提高轮轨固有物理特性和改善机车的动力及传动系统、机械系统和控制系统的动态特性各个方面着手。图 2.2-62 给出了从各个不同层面出发提高机车黏着利用的可行方法。由于机车的动力及传动系统、机械系统在制造完成后很难调整，因此通过控制系统提高黏着利用成为提高黏着利用的主要方法。

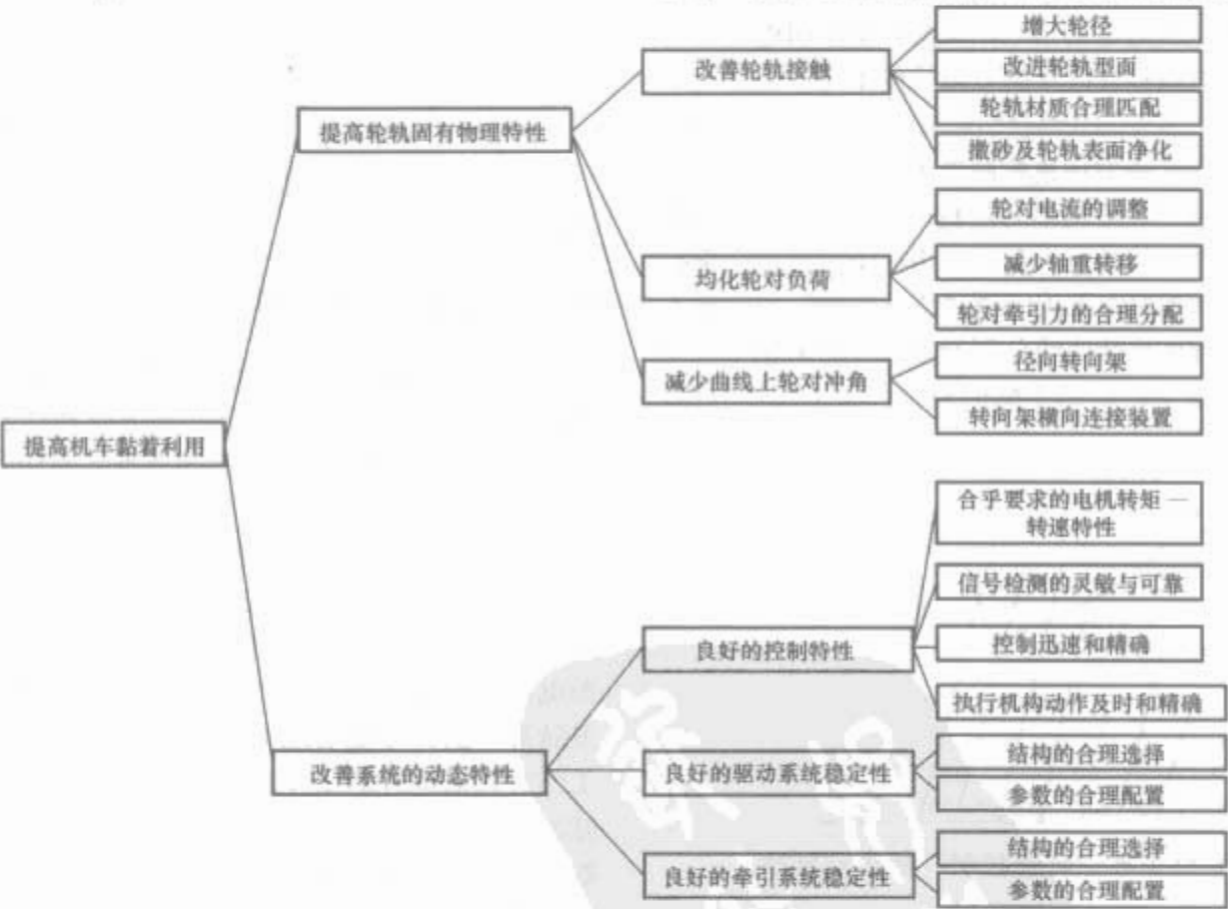


图 2.2-62 提高机车黏着利用的系统框图

5.4.3 黏着利用控制

在现代机车控制中，黏着利用控制是机车传动控制系统的一部分，如图 2.2-63 所示，它的主要作用是在线路状况变化不定的情况下，通过对电动机速度、电动机转矩等信息的采集、分析和处理，结合由司机给出的电动机转矩指令，向电动机控制系统发出正确的电动机转矩指令，使机车能够以线路当前最大的黏着因数运行，从而获得最大的黏着利用率。黏着利用控制的目标就是在机车运行过程中，使实际的

黏着因数尽量逼近于当时路况的黏着因数最大值 μ_{\max} ，从而获得最大的平均牵引力。

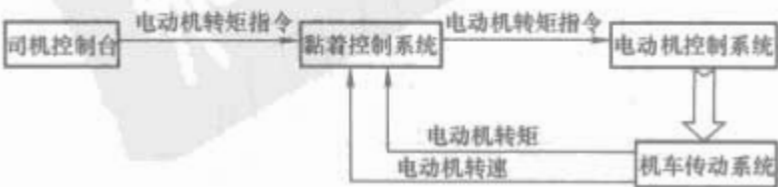


图 2.2-63 黏着利用控制系统在机车传动控制中的位置

从黏着特性可知,要实现黏着利用控制,使黏着因数得以最佳利用,只要找到黏着峰值点并使机车实际的黏着工作点位于该点即可,这也是黏着利用控制系统的基本目标 and 设计原则。但是,由于机车运行时的工作状况非常复杂,轮轨间的黏着状态随时间、空间而不断变化,黏着特性的分散性和复杂性很大,造成黏着因数最大值和蠕滑速度之间没有单一的对对应关系,黏着峰值点总是变化不定的。因此,黏着利用控制是一项比较艰巨且富有挑战性的工作。

5.4.3.1 传统的黏着控制

在黏着控制的初期阶段,黏着控制的主要方法是在空转和滑行发生后,通过削减电动机转矩(或电流)来实现黏着利用,这是直传动机车上普遍采用的方法。其一般过程如下:

- (1) 根据轮对间速度差、轮对的加速度及加速度的变化率来检测空转或滑行的发生。
- (2) 在检测到空转或滑行后,根据空转或滑行的程度,削减电动机转矩(或电流)并维持一定时间,以消除空转或滑行。
- (3) 在空转或滑行结束后,按一定斜率或指数规律逐渐增加电动机转矩(或电流),直至空转或滑行时电动机转矩值的 80%。
- (4) 在一定时间内保持电动机转矩(或电流)不变。
- (5) 如果在电动机转矩(或电流)不变的时间内未发生空转或滑行,则在保持时间结束后,按一定斜率或指数规律继续增加电动机转矩(或电流),直至达到由司机手柄给出的电动机转矩(或电流)给定值。如果再次发生空转和滑行,则按照第(2)条来处理。

图 2.2-64 是 8K 机车空转发生后电流修正值与 Δv , dv/dt , d^2v/dt^2 间的函数关系,同时也表示了空转消除后电流的恢复速率,图中 COR(A) 为制止空转的削减电流值。

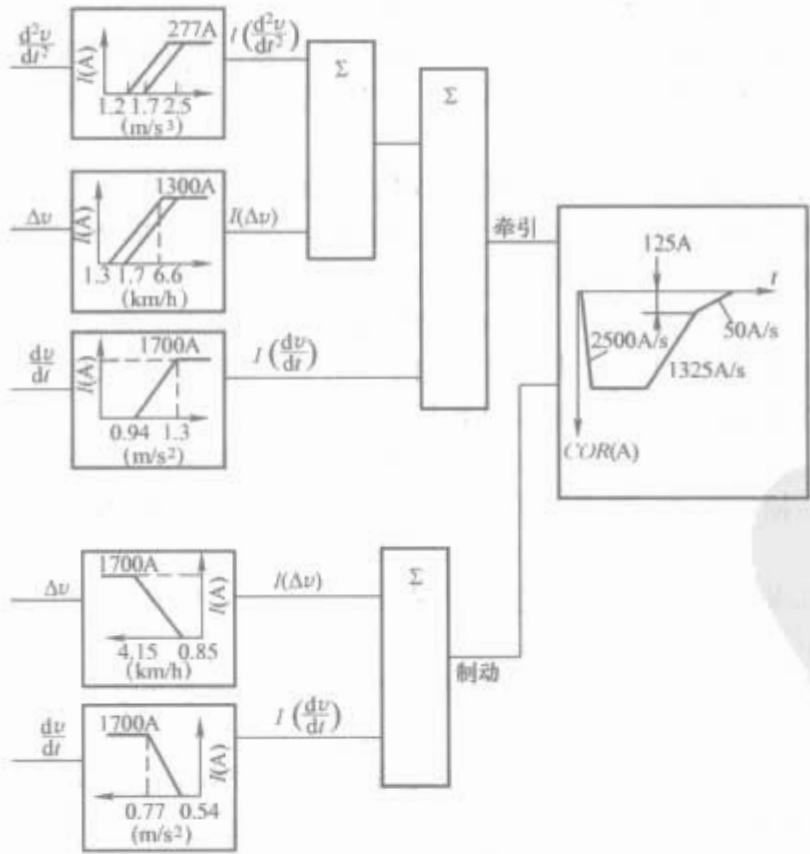


图 2.2-64 电流修正值框图

dv/dt 对防滑行有着重要的作用。由于与滑行的 μ_{max} 对应的蠕滑率较高,用 d^2v/dt^2 为参考量进行校正时,其滑行值过大。在制动时,不允许轮轴间有较大的滑行,为此以 dv/dt 作主要修正参考量。总的来说,制动时黏着利用系数较牵引时低,故一般设计中,防滑行处于较次要地位。

为了消除轮径的影响,在惰行工况,速度不大于 20km/h 时对轮径自动进行校正并自动保存,以使速度的检测精度提高到 1% 以内。

5.4.3.2 现代黏着利用控制

从对最初的黏着利用控制方法的分析可以发现,这种黏着利用控制方法没有对黏着峰值点进行搜寻,这样自然无法获得较高黏着利用率。有别于最初的黏着利用控制方法,近代黏着利用控制方法的一个显著特点是能够自动搜寻黏着峰值点,并使黏着工作点保持在黏着峰值点的附近,从而能够获得较高的黏着利用率。根据搜寻黏着峰值点方法的不同,近代黏着利用控制方法可以分为蠕滑速度法和黏着斜率法两大类。

(1) 蠕滑速度法。基于蠕滑速度的黏着利用控制方法原理比较直观,它是根据黏着特性曲线,通过调节蠕滑速度,使其反复地增加和降低,从而自动搜寻黏着峰值点。根据蠕滑速度是否直接参与控制,蠕滑速度法又可以分为直接法和间接法,其中间接法建立在直接法的基础之上。

1) 直接法。在直接蠕滑速度黏着利用控制方法中,蠕滑速度必须是已知的,从而能够根据图 2.2-65 中蠕滑速度和黏着因数之间的黏着特性,完成黏着峰值点的搜寻,实现最佳黏着利用控制。

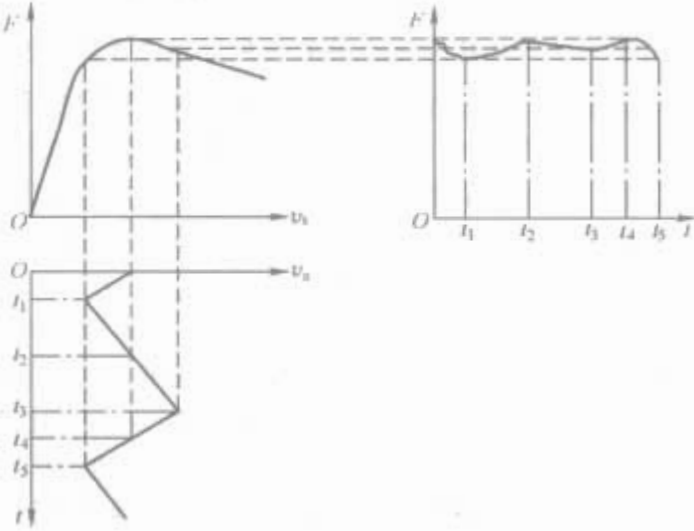


图 2.2-65 直接蠕滑速度法循环搜寻黏着峰值点的理想过程

从图 2.2-65 可以发现,如果蠕滑速度从零开始逐渐增加,那么在蠕滑速度增加的过程中,黏着因数必将会经过其最大值 μ_{max} 。相应地,牵引力也必将经过其最大值 F_{max} ,并且当牵引力越过最大值 F_{max} 后,只要逐渐减少蠕滑速度,就能使牵引力朝最大值 F_{max} 所在的方向移动。显然,在减少蠕滑速度的过程中,牵引力也会越过最大值 F_{max} ,但只要在发现牵引力越过最大值 F_{max} 后,又立即逐渐增加蠕滑速度,牵引力又会重新趋向于最大值 F_{max} 。这样,通过反复地调节蠕滑速度,实际黏着点将在黏着峰值点的附近变化。虽然蠕滑速度法不能够获得最大的牵引力,但实际黏着点偏离黏着峰值点的距离愈小,可以获得的平均牵引力就愈大。更重要的是,由于蠕滑速度循环地增加、减少,因此当黏着特性动态变化时,这种方法能够自动搜寻相应的黏着峰值点。图 2.2-65 给出了蠕滑速度法循环搜寻黏着峰值点的理想过程。

显然,在直接蠕滑速度黏着利用控制方法中,准确地获取蠕滑速度是实现黏着利用控制的关键。由于车轮速度容易测量,因而获取蠕滑速度的关键是如何准确地获取机车车体速度。机车车体速度的测量十分困难,虽然通过从动轮或多普勒雷达可以测量到车体速度,但这些方法除了增加设备外,在起动或雨、雪等较恶劣天气状况时测速精度也较差。

因此，直接蠕滑速度法在实际中应用不多。

2) 间接法。直接蠕滑速度黏着利用控制方法的原理虽然简单，但由于蠕滑速度不易获得，应用受到限制。经认真分析直接蠕滑速度黏着利用控制方法后可以发现，在蠕滑黏着利用控制过程中，蠕滑速度本身的大小并不重要，重要的是：①怎样确定正确的蠕滑速度调节方向，即是应当增加还是减少蠕滑速度；②在确定调节方向后，怎样对蠕滑速度进行调节。基于这一分析结果，人们提出了一种无需蠕滑速度的间接蠕滑速度黏着利用控制方法，图 2.2-66 为该方法的原理框图。

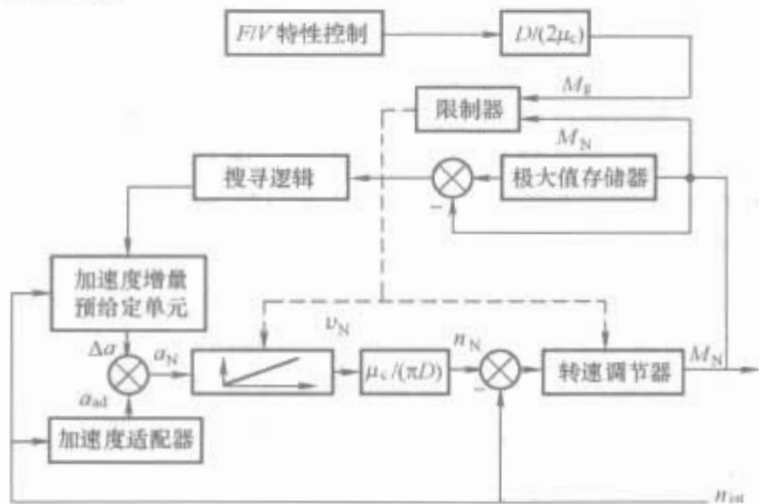


图 2.2-66 间接蠕滑速度黏着利用控制法原理框图

整个系统的工作过程是：司机通过操纵手柄设定手动给定转矩 M_g ，将 M_g 与电动机的输出转矩 M_N 进行比较，当 $M_N > M_g$ 时，限制器将根据一定的算法调节加速度积分器的输出以及转速调节器的输出，如图 2.2-66 中的虚线所示。必须注意，限制器仅在 $M_N > M_g$ 才起作用。

加速度适配器的功能是完成对机车车体加速度 a 的计算。车体加速度 a_{ad} 和加速度增量给定单元的输出 Δa 相加生成车轮加速度给定值 a_N ，从而可以通过调节 Δa 的极性来调节蠕滑速度的方向。加速度给定 a_N 经积分后形成车轮转速闭环控制系统的转速给定值 n_N 。转速调节器根据转速误差计算出相应的三相电动机额定转矩 M_N 。由于转矩调节环的动态性能较高，因此三相电动机额定转矩 M_N 可以视为其输出的实际转矩。

在转速调节的过程中，三相电动机的额定转矩 M_N 是不断变化的。额定转矩 M_N 的最大值 M_{Nmax} 被保存在极大值存储器中，并不断地与额定转矩 M_N 相比较，当检测逻辑发现它们的差值 $M_{Nmax} - M_N$ 大于设定值 ΔM_{max} 时，将改变加速度增量给定单元的输出 Δa ，使新的加速度增量和原加速度增量完全相反，从而正确地调节蠕滑速度的方向。此外，检测逻辑还将极大值存储器的值 M_{Nmax} 设置为当前的额定转矩 M_N 。

图 2.2-65 中系统的给定与一般的转速调节系统不同，是加速度给定，即通过加速度给定确定转速给定，再通过闭环转速调节确定三相交流电动机的转矩给定。因此通过改变加速度给定的大小，可以调节蠕滑速度的大小。

(2) 黏着斜率法。在蠕滑速度法中，通过比较搜索过程中牵引力或黏着因数的大小可以判别是否搜寻到黏着峰值点。与蠕滑速度法不同，黏着斜率法是通过黏着曲线斜率的判别实现黏着峰值点的搜寻。为说明该方法的基本思想，在介绍黏着斜率法之前，先对黏着曲线的斜率特性进行分析。

对于图 2.2-61 中的黏着特性曲线，以其中的干燥路况为例，如果计算黏着因数 μ 相对蠕滑速度 v_s 的导数，即

斜率

$$\gamma = \gamma(v_s) = \frac{d\mu}{dv_s} \quad (2.2-95)$$

那么斜率 $\gamma(v_s)$ 随蠕滑速度 v_s 的变化将如图 2.2-67(a) 所示。为了便于比较，图 2.2-67(b) 同时给出了干燥路况时的黏着特性曲线。在黏着峰值点处，斜率 $\gamma(v_s) = \gamma(v_{sopt}) = 0$ 。而在黏着峰值点左侧的黏着稳定区，即 $v_s < v_{sopt}$ 时，斜率 $\gamma(v_s) > 0$ ；在黏着峰值点右侧的黏着非稳定区，即 $v_s > v_{sopt}$ 时，斜率 $\gamma(v_s) < 0$ 。这样，综合可得

$$\gamma(v_s) \begin{cases} > 0, v_s < v_{sopt} \\ = 0, v_s = v_{sopt} \\ < 0, v_s > v_{sopt} \end{cases} \quad (2.2-96)$$

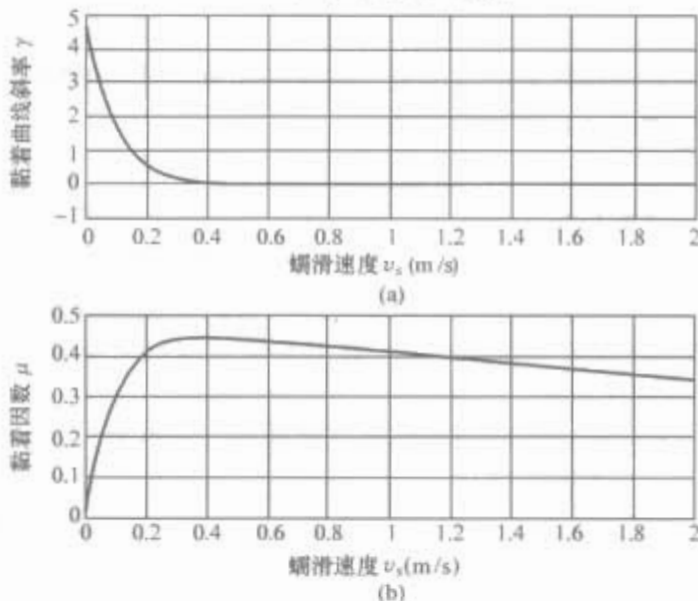


图 2.2-67 干燥路况的黏着曲线斜率 $\gamma(v_s)$

及黏着因数曲线 $\mu(v_s)$

(a) 黏着曲线斜率；(b) 黏着因数

显然，如果在机车运行过程中能够实时地获取黏着特性曲线斜率，并使黏着工作点位于斜率为 0 处，那么就能实现最佳黏着利用。但是，由于无法获得实际的黏着特性曲线，因而无法直接计算出黏着斜率，更无法完成对黏着峰值点的搜寻。

为了解决无法直接获得黏着斜率的问题，相位移法和黏着系数导数法被相继提出，它们都能间接地获得黏着特性曲线的斜率，并实现对黏着峰值点的搜寻。

1) 相位移法。相位移法建立在线性系统理论的基础上，其基本原理是通过相位移的测量或计算，间接地获取黏着特性曲线斜率，实现最佳黏着利用。

设 $G(r)$ 是以 r 为参数的线性系统，根据线性系统理论，在幅值为 A 、频率为 f 、相位为 φ 的正弦信号的激励下

$$u(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (2.2-97)$$

如果参数 r 在激励的过程中保持不变，那么系统 $G(r)$ 的输出将为

$$y(t) = |G(f, r)| \sin[2\pi ft + \varphi + \psi(f, r)] \quad (2.2-98)$$

式中： $\psi(f, r)$ 为相位移，它是激励信号频率 f 和系统参数 r 的函数，可以用图 2.2-68 所示的正交相关法进行测量。显然，如果保持激励信号的频率 f 不变，则相位移仅随参数 r 变化，即 $\psi(f, r) = \psi(r)$ 。进一步，若相位移 $\psi(r)$ 和参数 r 之间还有单值对应关系，那么根据相位移 $\psi(r)$ 就能唯一地确定相应的参数 r 。

从黏着因数和蠕滑速度之间的非线性黏着特性可知，运行过程中的机车传动系统动力学模型是一个非线性系统。但是通过对黏着工作点的局部线性化处理，可以得到局部线性

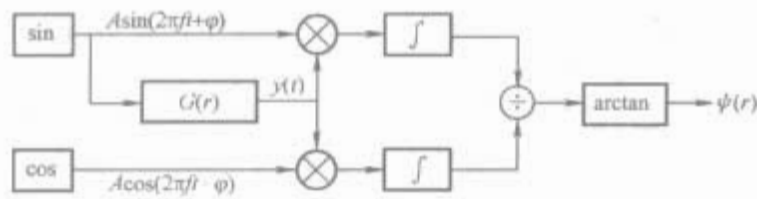


图 2.2-68 相位移的正交相关法测量简图

化的机车传动系统动力学模型。

这样，虽然黏着工作点处的斜率 $\gamma(v_s)$ 无法直接测量，但是根据前面的分析，可以利用正交相关法通过测量相位移 $\psi(r)$ 间接地获取黏着斜率 $\gamma(v_s)$ 。以 Re460 型机车为例，通过在系统的输入信号，即电动机转矩给定指令上叠加一定频率(7~10Hz)和幅度(电动机额定转矩的 2%~4%)的正弦测相信号，并对系统的输出信号电动机转速进行滤波处理，获得对应于正弦测相信号激励的系统输出，利用正交相关法就可以计算出相位移 $\psi(r)$ 。由于 Re460 型机车在测相信号频率为 7~10Hz 时，相位移 $\psi(r)$ 和黏着斜率 $\gamma(v_s)$ 之间存在单值对应关系，因此当固定测相信号频率后，根据相位移 $\psi(r)$ 就可以唯一地确定相应的黏着斜率 $\gamma(v_s)$ 。

应当说明的是，当相位移 $\psi(r)$ 和黏着曲线斜率 $\gamma(v_s)$ 之间存在单值对应关系时，对黏着利用控制而言，它们的作用是等价的。因此在相位移黏着利用控制系统中，不再利用黏着曲线斜率 $\gamma(v_s)$ ，而是根据相位移 $\psi(r)$ 来实现黏着利用控制，如图 2.2-69 所示。

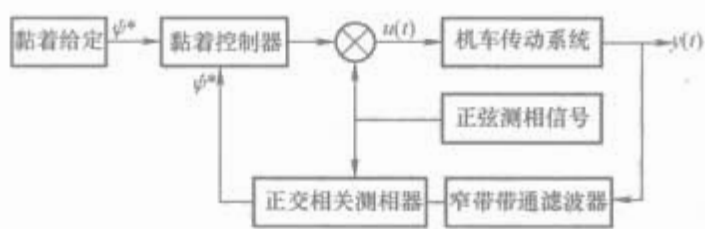


图 2.2-69 相位移法黏着利用控制系统原理框图

2) 黏着因数导数法。与相位移法利用黏着斜率和相位移之间的单值对应关系，通过相位移间接获得黏着斜率的复杂过程不同，黏着因数导数法的原理简洁、直观。

黏着斜率 γ 定义为

$$\gamma = \frac{d\mu}{dv_s} \tag{2.2-99}$$

在黏着峰值点的黏着斜率为 0，即

$$\gamma = \frac{d\mu}{dv_s} = \frac{d\mu/dt}{dv_s/dt} = 0 \tag{2.2-100}$$

由于机车加、减速过程中，蠕滑速度 v_s 总是不断变化的，即 $dv_s/dt \neq 0$ ，因此，可进一步表示为

$$\frac{d\mu}{dt} = 0 \tag{2.2-101}$$

这样，在黏着因数可行的条件下，就可以完成对黏着峰值点的搜寻，但关键问题是如何获取黏着因数 μ 。

根据黏着因数 μ 的定义，由于机车轴重 W 是一常量，因此只要求得机车牵引力 F ，就能计算出黏着因数 μ 。而对于机车牵引力 F ，由图 2.2-70 单个车轮运动模型得计算机车牵引力 F 的运动方程为

$$F = \frac{1}{R} \left(T - J_n \frac{d\omega}{dt} \right) \tag{2.2-102}$$

式中： R 是车轮半径； J_n 是折算到车轮的转动惯量； ω 是车轮转速； T 是电动机转矩。

在计算出机车牵引力 F 的基础上，再计算出黏着因数 μ ，最终根据 $d\mu/dt=0$ 完成对黏着峰值点的判断和搜寻。

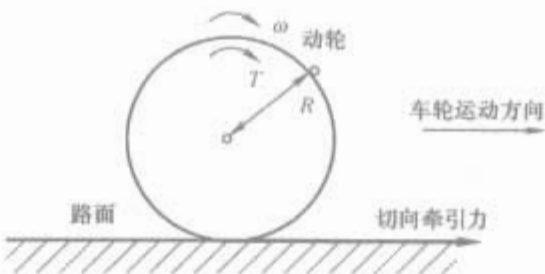


图 2.2-70 单个机车车轮运动模型

5.4.3.3 黏着利用控制的发展方向

良好的黏着利用是提高机车牵引性能的有效手段，高效的黏着利用是黏着利用控制系统追求的目标。然而，由于黏着特性随线路状况的复杂多变性及由此带来的不确定性，设计性能良好的黏着利用的控制系统是一项十分困难的工作，其中最困难的地方在于如何搜寻黏着峰值点。

在现有黏着利用控制方法中，直接蠕滑速度法的原理最为简单、直观，但控制所需的蠕滑速度却不易获得。间接蠕滑速度法通过匹配车体加速度并调节车轮相对车体的加速度实现对蠕滑速度的调节，毋需知道蠕滑速度就能实现黏着利用控制；然而，车体加速度的匹配算法建立在机车未发生严重空转或滑行的基础上；当发生严重的空转或滑行时，车体加速度的匹配值常会偏离其实际值，从而对系统的性能造成影响。黏着斜率法通过对黏着曲线斜率的检测实现黏着峰值点的搜寻，需要计算黏着因数对时间的微分值，由于微分运算对噪声有放大作用，因此容易受到噪声信号的干扰。相位移法虽然不需要进行微分运算，但为了获得相位移必须在电动机转矩指令上叠加一定幅度的测相信号，该叠加的测相信号对电动机控制系统是一种无法消除的干扰，必然影响电动机控制系统的性能。如何综合现有的各种黏着利用控制方法，扬长避短，获得更好的黏着利用控制方法是当前黏着利用控制研究的重点。此外，针对黏着特性复杂多变的不确定性特点，将模糊和神经网络等智能控制技术应用用于黏着利用控制也是一个值得探讨和研究的课题。

国内交流传动机车的黏着控制在黏着斜率法的基础上，应用自适应原理，通过实时、快速地检测电动机转速和机车牵引力的变化，不断寻找最佳黏着点来确定当前的给定转矩门槛，从而实现最优黏着利用；同时针对路况复杂多变的情况，设计了灵敏的空转抑制方法。由于交流传动响应较快，空转抑制迅速，它与传统的防空转技术相比取得了较好的效果。试验表明，国产交流传动机车的黏着利用比传统的交直传动机车可提高 11% 以上。

5.5 电力机车自动过分相

为使电力系统三相负荷尽可能平衡，电气化铁路的接触网采用分段换相供电。为防止相间短路，相间用空气或绝缘物分割，称为电分相。为减轻司机劳动强度和提高工作可靠性，尤其是速度较高的线路，必须采用自动过分相。目前世界上自动过分相有 3 种方案，即地面断路器自动切换方案、柱上断路器自动断电方案和车上自动控制断电方案。

5.5.1 地面断路器自动切换方案

以日本新干线为代表。在地面建立分区所，依靠分区所中的断路器来分合机车的负载电流。这种方案的优点是断电时间短，无需司机操作，但投资巨大，维护工作量也大。断路器必须带负荷分断，因而需经常检修维护。为便于检修而又不影响运行，断路器需考虑冗余切换。如果没有车上设备的协同动作，其合闸冲击电流很大，会使列车产生冲动，影响旅客的舒适性。如果需要车上协同配合，就必须把过分相

预告信号送到车上,但这样一来,自动过分相可由方案3实现,而投资巨大的方案1就失去了意义。所以目前除日本由于习惯仍然采用方案1外,其他国家都不采用此方案。

5.5.2 柱上断路器自动断电方案

以奥地利为代表。该方案由于它不适合于高速,也不能适应宽广的速度范围,过分相时易拉弧等固有缺点,现在已经被淘汰。

5.5.3 车上自动控制断电方案

这是当前自动过分相方案的主流。随着微机控制技术在机车上的运用,该方案得到了迅速发展。该方案的工作原理是由地面提供过分相预告信号,而其他工作都由车上自动完成。机车在得到自动过分相预告信号后,首先进行确认,然后进行降功指令,累计收到预告信号后的行驶距离,适时封锁触发脉冲,在行驶到某个固定位置时,分断主断路器。在驶出分相区后,由机车自动检测网压从无到有的跳变并确认,再合主断路器,顺序起动辅机,然后限制电流上升率,使列车平稳加速。该方案除过分相预告信号与地面设施有关外,其余一切操作都由动车上自动完成,无需人工干预。由于该方案脉冲封锁在先,主断路器只需分断较小的辅机电流,从而不会影响其电寿命;过分相区后,由于控制了电流上升率,即使手柄不退回,也不会使列车产生冲动;而且投资较低,因而得到推广。国内在2005年已决定在六大干线推广这种过分相方案。

关于过分相预告信号,对于速度不大于200km/h的线路,采用轨枕上预埋磁钢,机车上加装感应接收线圈的方法是可行的。对于没有预埋磁钢的低速线路,可在司机台上设一按钮,司机看到“断”牌时按下此按钮,发出过分相预告信号,其他工作由机车自动完成。这种方法又称半自动过分相,它也可减轻司机的劳动强度。对于300km/h以上的线路,采用预埋磁钢的方法是不可行的,这是由于感应的脉冲很窄,难于展宽成可靠的信号。此时较好的方法是预埋点式信号,由车上ATP接收后,再由ATP向机车控制装置转发过分相预告信号。

5.6 控制系统发展的几个阶段

控制系统发展经历了有触点控制、模拟控制、微机控制和网络控制4个阶段。

5.6.1 有触点控制阶段

该阶段以主令电器、大量的中间继电器和时间继电器以及接触器的联锁触点组成的逻辑控制电路,以SS₁电力机车为代表。在一条电路中可能串入10个以上触点,任一触点拒绝闭合或接触不良都可能引起逻辑不正确。另外还要防止迂回电路造成误动作。这是机车控制的初级阶段。

5.6.2 模拟控制阶段

在该阶段,以运算放大器为核心的模拟电路控制取代了机车上的相当一部分的逻辑电路。这是在8K机车引进吸收消化的基础上,通过改进实现的,以SS₄G、SS₈B、SS₇机车为代表。从有触点控制到成熟的模拟控制中间还经历过以分立元件和小规模集成器件为主的摸索过程。通过运算放大器可以构成各种加、减、放大或缩小的电路;再通过比较器可以构成一定的逻辑电路,可以控制输入和输出的量值及延时,可以进行输入或输出阻抗的变换。从而使原来的有触点控制电路得以简化,控制功能得以提升。

5.6.3 微机控制阶段

在该阶段,以CPU(中央处理单元)为核心的数字电路控制取代了原有的模拟控制功能,并自行开发了诊断显示

功能。它是在吸收消化8K机车(其中2台)微机控制、6K机车微机控制技术的基础上,以8K为蓝本,加6K故障诊断功能,并在司机室中安装了显示屏,提供了友好的人机交互界面,发挥微机在故障诊断、故障记忆、逻辑推理和判断方面的优势,使控制水平上升到新的台阶。代表机车有SS₈、SS₉、SS₇E、SS₄B等。

内燃机车的微机控制是在吸收ND₅内燃机车的基础上国产化的。现又自行开发了32位微机的新一代控制系统。代表机车有DF₈B和DF₁₁。

5.6.4 网络控制阶段

随着信息技术的成熟,网络控制得到了大量应用,控制已不再局限在一个车辆上。由于计算机控制的部件越来越多,逻辑控制单元(LCU)的出现替代了原来大量的中间继电器,从而使机车布线简化、减少了维修工作量,提高了工作的可靠性。为实现全列车所有机车、动车的重联控制以及全列车的车门、空调的集中控制,必须通过网络将全列车上所有由计算机控制的部件联网,实现统一处理和资源共享。

列车通信网络正朝着分布式、模块化、标准化方向发展。分布式布置可使信息就近采样和输出,从而简化了机车布线,减少了相互之间的干扰,也便于故障的查找。另外3G(GPS/GSM/GPRS)和WLAN技术在列车上的应用也在发展中,通过挂在车辆总线上的3G或WLAN信号处理部件将接收的3G信号处理后送到相关的设备;需要采用3G技术发送的信息,经车辆总线汇集到3G或MLAN信号处理部件,处理后再经无线方式发送。

目前在LCS32内燃机车微机控制系统中已用GPS测出机车所处海拔高度、地理位置等信息,用于机车高原功率修正及结合GIS技术进行机车运行轨迹跟踪等;用GPRS无线通信技术完成机车运行参数的地面监视及一些控制参数的地面设置等功能。

6 制动系统

列车制动技术是在20世纪初美国为适应铁路运输的要求而发展起来的,主要是采用压缩空气推动的闸瓦进行制动,从而到达减速及停车的目的。从那时起到现在,制动技术有了很大的改进及发展,特别是铁路高速、重载发展的需求,目前车辆制动已从纯空气制动机到电空制动机,并采用电阻制动、再生制动、涡流制动、磁轨制动及各方式下的联合制动。

列车制动按制动力的来源可分为摩擦制动和非摩擦制动两类。摩擦制动包括:将闸片压紧车轮踏面进行摩擦的手制动、真空制动、空气制动和电空制动;将闸瓦压紧车轮或车轴上的制动盘进行摩擦的盘形制动;将电磁铁接通励磁电流吸附在钢轨上,由磨耗板与钢轨轨面进行摩擦的磁轨制动。摩擦制动的特点是通过摩擦使列车动能转化成热能散放于大气中,摩擦力通过轮轨相互作用引起制动力。属于非摩擦制动的有机车动力制动(电阻制动、再生制动)和涡流制动。机车动力制动是由机车原动机或动力机将列车动能转化成动轮上的反向扭矩。涡流制动是由电磁铁与钢轨间的相对速度引起涡流作用。反向扭矩和涡流作用都会形成制动力。

总结目前及发展的制动方式,共有7种,可分为3类:

(1) 受黏着限制的摩擦制动。包括闸瓦(踏面)制动、盘形制动(摩擦式圆盘制动)。

(2) 受黏着限制的动力制动。包括电阻制动、再生制

动、旋转涡流制动（涡流式圆盘制动）。式轨道电磁制动）、线性涡流制动（涡流式轨道电磁制动）。
(3) 不受黏着限制的非黏着制动。包括磁轨制动（摩擦各种制动形式的比较见表 2.2-27。

表 2.2-27 各种制动形式的比较

制动形式			优 点	缺 点	应用范围
黏 着 制 动	动 力 制 动	加锁电阻制动	控制方式简单，低速制动性能好	能量通过制动电阻以热能的形式耗散，不节能；制动力特性欠陡；黏着利用差	相控机车及动车组
		交—直传动再生制动	低速性能好，节能，制动力特性较陡	功率因素低，谐波干扰大，控制系统复杂，失控易产生“颠覆”过载	相控机车（有一段全控桥）
		交—直—交传动再生制动	节能，制动力特性陡，功率因素高，谐波干扰小	控制复杂，成本高	交—直—交传动机车及动车组
	机 械 制 动	踏面制动	简单，技术成熟，可靠性高	生铁闸瓦高速制动力小，合成闸瓦散热差，磨损车轮踏面	机车及客货车辆
		盘形制动	可靠性高，不磨损车轮	设备复杂	高速机车及动车组
非 黏 着 制 动	涡流制动		由电磁铁产生磁场，机车运行时，钢轨切割磁力线引起电涡流产生制动力，与钢轨黏着无关，无摩擦，制动力大，特别适用于高速	耗电大，钢轨因涡流而发热	高速动车及车辆
	磁轨制动		利用永久磁铁或电磁铁与钢轨间的磨擦力产生制动力，与黏着无关，结构简单	对钢轨磨耗大	高速机车、动车、城轨车辆

根据制动的动力源来划分，可分为空气制动与电气制动方式。本章是根据该方式来进行阐述的。

6.1 空气制动

按空气制动原动力和操纵控制方法的不同，机车车辆制动机可分为手制动机、空气制动机和真空制动机三种。

(1) 手制动机。其特点是以人力为原动力，以手轮的转动方向和手力的大小来操纵制动控制。铁路发展初期，每辆车都有这种装置，每车都配备至少一名操作员，根据司机的笛声号令协同操纵。随着制动技术的发展，手制动机退出历史舞台，仅起停放机车车辆的制动作用。

(2) 空气制动机。其特点是以压力空气作为原动力，以改变空气压强来操纵制动控制。它的制动力大、操纵控制灵敏便利。空气制动机又可分为直通式空气制动机和自动式空气制动机。直通式空气制动机的基本特点是列车管直接通向制动缸，列车管充气时制动缸也充气，发生制动；列车管排气时制动缸也排气，发生缓解。其优点是构造简单，操纵灵活方便，又有阶段制动，又有阶段缓解；缺点是当列车发生分离事故、制动软管被拉断时，将彻底丧失制动能力，而且列车前后部发生制动作用的时间差太大，不适用于编组较长的列车。自动式空气制动机的基本特点与直通式截然相反，它是列车管排气时制动缸充气，发生制动；列车管充气时制动缸排气，发生缓解。优点是当列车发生分离事故、制动软管被拉断时，列车管风压将急剧下降，三通阀将自动而迅速地左移到制动位，由于各车都有副风缸向制动缸供风，制动缸动作较快，其压强上升也快，列车能自动迅速制动直至停车，而且列车前后部开始制动作用的时间差比直通式要小，也适用于编组较长的列车。该方式在世界各国得到了广泛且最持久的应用。

(3) 真空制动机。其特点是以大气为原动力，以改变真空度来操纵制动控制。由于绝对真空很难达到，且压强最高值仅能达到 100kPa，影响了列车制动力的发挥，目前真空

制动正在向空气制动机过渡。

电空制动机为电控空气制动机的简称，它是在空气制动机的基础上加装电磁阀等电气控制部件而形成的，特点是制动作用的操纵控制用电指令，但制动作用的原动力还是压缩空气，在制动机的电控因故失灵时，它仍可以实行空气压强控制，临时变成空气制动机。在列车速度很高或列车编组很长、空气制动难以满足要求时，采用电控制动机可以大大改善列车前后部制动和缓解作用的一致性，显著减轻列车纵向制动冲击并缩短制动距离。电空制动机又分为电空自动式制动机和电空直通式制动机。

空气制动的基础制动方式有踏面制动和盘形制动方式，在今后的应用中盘形制动将起主要作用。

空气制动作为最基本的制动方式，广泛应用于各种轨道车辆上。

6.2 电制动

随着轨道运输事业的发展，特别是高速列车的研制和城市轨道车辆的现代化及重载列车运输需要，轨道交通车辆制动技术越来越受到重视，现代轨道交通的制动已从单纯的空气制动向复合型制动方向发展，并以电制动为主。

电制动包括电阻制动、再生制动、涡流制动、磁轨制动等，前两种制动又称为动力制动。而高速列车的出现，使涡流制动、磁轨制动等新的制动技术获得很大的发展。

电制动的优越性表现在：

- (1) 提高了列车行车的安全性。列车除机械制动系统外，由于配备了电气制动系统，因而提高了列车运行的安全性。
- (2) 减少了闸瓦和车轮磨耗。
- (3) 提高了列车运行的速度。
- (4) 电制动的空走时间短。

6.2.1 动力制动

动力制动分电阻制动和再生制动，原理都是将牵引电机

作为发电机用,将机车的动能转换为电能,区别在于电阻制动将这些电能消耗在制动电阻上,而再生制动则将电能回馈给电网。交一直传动机车通常采用电阻制动,有些交一直机车也采用了再生制动,交一直—交传动机车通常采用再生制动。

(1) 电阻制动时,牵引电机作为发电机,发电机电枢绕组产生的电动势与电机磁通和转速成比例关系,其电动势施加在由制动电阻、平波电抗器、电枢绕组等构成的回路中产生相应的制动电流,旋转切割电机磁场的磁力线而产生反作用力矩,该作用力矩即为电机的制动力。

(2) 交一直传动机车采用再生制动时,牵引电机作为发电机运行,其产生的电能需要通过全控桥变流器、牵引变压器传输到接触网上。发电机工作时,发电机电枢绕组产生的电动势与电机磁通和转速成比例关系,电动势施加在由稳定电阻、牵引变流器全控桥、牵引变压器二次绕组、平波电抗器、电枢绕组等构成的回路中产生相应的制动电流,流过电流的电枢绕组由于旋转切割电机磁场的磁力线而产生电磁反力矩,该作用力即为电机的制动力。同时,通过控制全控桥的逆变运行,改变变压器二次绕组电流方向而产生交变电流,通过变压器在一次侧感应出交流电而将发出的电能传输到接触网上。

(3) 交一直—交机车的再生制动是通过四象限变流器、逆变器构成的主变流器来进行换流,并通过相关的控制来实现。工作时,三相交流电机发出的电经过逆变器变成直流电,直流电又通过四象限变流器在牵引变压器二次绕组产生交变的电流,该交变的电流通过牵引变压器而将电能传输到接触网上。制动时,电机的鼠笼转子产生的感应电流切割磁力线而产生反作用力,也即制动力。

电阻制动和再生制动作为除空气制动外的另两种制动方式,大量应用于机车、动车组、地铁及城轨车辆上。

6.2.2 涡流制动

涡流制动是电制动方式的一种,其原理是利用导磁体在磁场中高速运动产生涡流效应,从而产生制动力进行制动。从原理上可见,涡流制动一般在高速条件下才能发挥作用,速度越高效果越好,速度低时涡流制动将不能发挥作用。由于机械摩擦制动在高速条件下使用效果变差,因此涡流制动可与机械摩擦制动形成互补关系。

根据导磁体在磁场中运动方式不同,涡流制动又可分为线性涡流制动和轮盘涡流制动。线性涡流制动由多个电磁铁排成直线,以钢轨作为导磁体,通过在机车车辆运动时电磁铁相对钢轨的直线运动形成涡流产生制动力,此时钢轨上将产生很大的热量。线性涡流制动与轮轨黏着没有关系,是非黏着制动。轮盘涡流制动仿照盘形制动形式,只是将闸片换成电磁铁,通过高速时制动盘的旋转与电磁铁产生涡流效应,从而在制动盘上产生制动力。因制动力的发挥仍受轮轨黏着的影响,所以盘形涡流制动仍属摩擦制动。

涡流制动的优点是高速下能产生较大的制动力,没有摩擦副,减少了维护工作量;缺点是增大了转向架质量,线性涡流制动有可能对轨道的通信产生影响,钢轨发热可能导致钢轨变形。

涡流制动通常用于高速列车及动车组相关车辆上。

6.2.3 磁轨制动

磁轨制动的全称是电磁轨道制动,是给悬挂在转向架上的电磁铁通电后,使其与钢轨间产生吸力,牢牢地吸在钢轨上,靠电磁铁与钢轨间的摩擦来制动。磁轨制动属于非黏着制动,制动力不受轮轨间黏着系数的限制。由于磁轨制动时

电磁铁与钢轨间的摩擦表面远远大于滚动摩擦表面,因此,其摩擦力远大于滚动摩擦力,也使得其制动效率远大于轮盘制动和踏面制动。磁轨制动不但能在高速制动发挥作用,也能在低速制动时发挥作用。

磁轨制动主要作为一种辅助制动方式,用于黏着力不高的高速旅客列车的紧急制动中;有些城轨车辆也采用了磁轨制动。

按磁铁悬挂方式,磁轨制动可分为高悬挂磁轨制动和低悬挂磁轨制动两种。高悬挂磁轨制动一般用在时速200km/h以上的高速列车或动车组上;低悬挂磁轨制动一般用在城轨列车、地铁上。

按磁铁的励磁作用原理,可分为永磁磁轨制动和电磁磁轨制动,采用哪种方式取决于车辆类型及使用要求。永磁磁轨制动在永磁技术获得迅猛发展的近几年得到了快速发展,其与电磁磁轨制动的区别在于:

(1) 永磁磁轨制动不需要外部能源。

(2) 当列车静止时制动仍有效,可以当作驻车制动使用。

磁轨制动的缺点是增加了转向架的质量,要求转向架要采用轻量化设计。另外,磁轨制动也加速了钢轨的磨损,缩短了钢轨的寿命。

6.3 联合制动

由于单一的制动方式都存在局限性,因此在许多场合采用多种制动方式联合使用来达到制动目的,这种情况下的制动称为联合制动。实际上在高速、重载和城轨交通领域的制动方式往往都采用联合制动方式,即多种制动模式并存。

在联合制动方式下,通常需要一套联合制动管理系统,正确协调控制各种制动模式的制动发挥,以达到最佳的制动效能。

现代高速列车及动车组、重载列车基本上根据应用要求均采用不同的制动方式相结合的联合制动。目前列车普遍采用了微机控制的空电联合制动系统,具备电制动(再生制动和电阻制动)和空气制动两种制动方式。

6.4 防滑控制

制动过程中轮轨之间如发生纵向的严重相对滑动,会造成车轮踏面的擦伤,此时需通过安装防滑装置来解决该问题。

车轮在钢轨上滚动的黏着状态实际上是一种“蠕滑”(滚动中有微滑动)的状态。当制动力小于黏着力时,这种微量滑动不但不会导致制动滑行,相反,还可以起清除轮轨接触处污垢和改善轮轨接触表面状态的作用。但是,当制动力大于黏着力时,轮轨接触面的纵向相对滑动就会急剧增大,在过渡阶段纵向滑动由小变大,最后导致车轮被抱死而产生制动滑行。

制动滑行过程中,制动摩擦力随车轮转速的下降和摩擦因数的急剧增大而剧增,制动力却随轮轨间的纵向相对滑动的急剧增大而急剧减小。防滑器的作用就是要在短暂的过渡阶段内检测出车轮即将发生滑行的可能,并及时动作,快速排出制动缸内的部分压力空气,使制动力迅速降至小于黏着力,以防止车轮滑行,维持车轮间的黏着;与此同时,防滑器立刻由发生作用状态恢复到停止作用状态,使制动缸及时再充风,尽量保持较大的制动力。

防滑控制一般应用在轮盘制动方式车辆上。

7 行车安全控制系统

7.1 基本概念

7.1.1 铁路信号

铁路信号是铁路“信号、联锁、闭塞”的总称，是由各类信号显示、轨道电路、道岔转辙装置等主体设备及其他有关附属设施构成的一个完整的体系。

7.1.2 联锁

是指为保证行车安全而将车站的所有信号机、轨道电路及道岔等相对独立的信号设备构成一种相互制约、互为控制的连带环扣关系，即联锁关系。

7.1.3 闭塞 (block)

指用信号或凭证保证列车之间必须保持一定间隔距离运行的技术方法，可分为固定闭塞、移动闭塞和准移动闭塞三种。

(1) 固定闭塞 (fixed block)。指前方列车与后续列车之间的最小安全追踪间隔距离单元预先设定且固定不变的闭塞方式。

(2) 移动闭塞 (moving block)。指前方列车与后续列车之间的最小安全追踪间隔距离单元不预先设定，而随列车的移动、速度的变化而变化的闭塞方式。

(3) 准移动闭塞 (quasi-moving block)。指前方列车与后续列车之间的最小安全追踪间隔距离单元预先设定且固定不变，并根据前方目标状态设定列车的目标距离和速度，是介于固定闭塞和移动闭塞之间的一种闭塞方式。

7.1.4 中国列车运行控制系统 (Chinese Train Control System, 简称 CTCS)

CTCS 是为了保证列车行车安全，并以分级形式满足不同线路运输需求的技术规范。

我国已编制中国列车运行控制系统 (CTCS) 技术规范，着手发展和装备列车运行控制系统。CTCS 技术规范是参照欧洲列车运行控制系统 (ETCS) 编制的。CTCS 技术规范 (暂行版) 规定 CTCS 体系结构按铁路运输管理层、网络传输层、地面设备层、车载设备层配置，如图 2.2-71 所示。

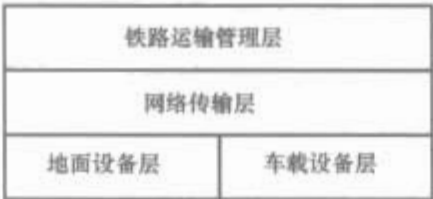


图 2.2-71 CTCS 体系结构

CTCS 的系统构成由 CTCS 应用等级决定。CTCS 根据功能要求和设备配置划分为 0~4 级共 5 个应用等级。

(1) CTCS0 级。车载设备由通用式机车信号+监控装置组成；地面设备为既有轨道电路。

(2) CTCS1 级。车载设备由主体机车信号+加强型监控装置+点式信息接收模块组成；地面设备为轨道电路+点式信息设备组成。点式信息作为连续信息的补充，可实现点连式超速防护功能。

(3) CTCS2 级。是基于轨道传输信息并采用车—地一体化系统设计的列车运行控制系统。可实现行车指挥—联锁—列控一体化、区间—车站一体化、通信—信号一体化和机电一体化。车载设备由车载安全计算机+连续信息接收模块+点式信息接收模块+测速模块+设备维护记录单元+运行管理记录单元+人机界面+预留无线通信接口组成；地面设备由列控中心+轨道电路+点式信息设备组成。

(4) CTCS3 级。是基于无线传输信息并采用轨道电路等方式检查列车占用情况的列车运行控制系统。点式设备主要传送定位信息。车载设备由车载安全计算机+无线通信 (GSM-R) 车载设备+点式信息接收模块+测速模块+设备维护记录单元+运行管理记录单元+人机界面组成；地面设备由无线闭塞中心 (RBC)+无线通信 (GSM-R) 地面设备+轨道电路+点式信息设备组成。

(5) CTCS4 级。是完全基于无线传输信息的列车运行控制系统。地面可取消轨道电路，由无线闭塞中心和车载验证系统共同完成列车定位和完整性检查，实现虚拟闭塞或移动闭塞。车载设备由车载安全计算机+无线通信 (GSM-R) 车载设备+测速模块+设备维护记录单元+运行管理记录单元+人机界面+全球卫星定位或其他设备+列车完整性检查设备组成；地面设备由无线闭塞中心 (RBC)+无线通信 (GSM-R) 地面设备组成。

轨道电路具有轨道占用检查、沿轨道连续传送地—车信息等功能。

点式信息设备又称点式应答器，是一种能向车载系统发送报文信息的传输设备，既可以传送固定信息，也可连接轨旁单元传送可变信息及临时限速信息。

无线通信网络 (GSM-R) 是用于车载子系统和列车控制中心进行双向信息传输的车地通信系统。

列车控制中心是基于安全计算机的控制系统。它根据地面子系统或来自外部地面系统的信息，如轨道占用信息、联锁状态等产生列车行车许可命令，并通过车—地信息传输系统传输给车载系统，保证列车控制中心管辖内列车的运行安全。

CTCS 的系统构成如图 2.2-72 所示。

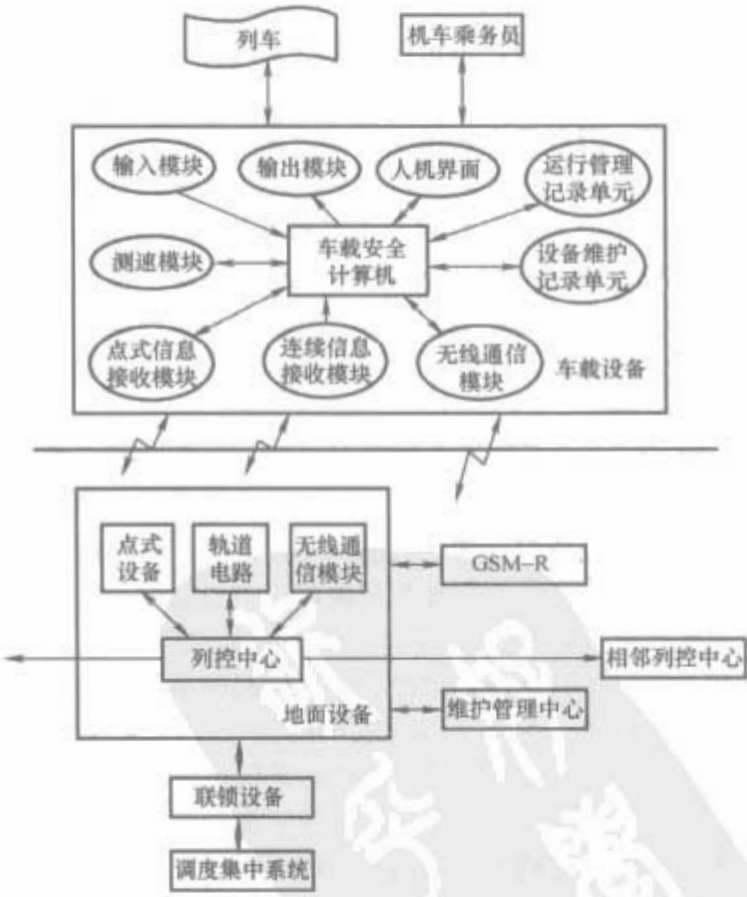


图 2.2-72 CTCS 的系统构成框图

7.1.5 列车自动控制 (Automatic Train Control, ATC)

列车自动控制是实现列车自动监控、列车自动防护、列车自动运行控制技术的总称。

7.1.6 列车自动防护 (Automatic Train Protection, ATP)

列车自动防护是实现列车运行间隔、超速防护、进路安全和车门等监控技术的总称。

7.1.7 列车自动运行 (Automatic Train Operation, ATO)

列车自动运行是自动实现列车运行速度控制、列车停车和车门开闭等监控技术的总称。

7.1.8 列车自动监控 (Automatic Train Supervision, AIS)

列车自动监控是实现行车指挥、列车运行监视和管理技术的总称。

7.1.9 机车行车安全装备

铁路机车行车安全装备是指装设于机车、动车以及自轮运转的特种设备上,用于直接防止列车运行事故或辅助机车乘务员提高安全操纵列车运行能力的装备。主要包括:列车运行监控记录装置(简称监控装置)、机车安全信息综合监测装置(简称 TAX 装置)、机车信号、列车无线调度通信设备(简称无线列调)以及与之配套的传感器、信息输入、信息输出和连接设备等。

7.2 行车安全控制技术的发展

7.2.1 国外列车超速防护技术

在铁路技术比较发达的国家,均建立了以保障列车行车安全为目的,以监控列车运行速度为手段对列车运行进行超速防护的控制系统(ATP)。ATP系统往往被作为一个完整的技术系统来描述,历史上是由轨道电路、机车信号、自动停车装置等各项技术逐步发展而来。它包含前方线路的占用信息、线路允许速度、列车制动能力等各种信息。

在城市轨道交通领域,为了使列车更安全、准时、快速,采用列车自动控制系统(ATC)。ATC是一套完整的控制、监督、管理系统,包括列车自动防护系统(ATP)、列车自动运行系统(ATO)及列车自动监控系统(ATS)。值班人员可以在值班室监视线路上各列车的运行情况。列车可以在ATC系统支持下,按调度中心计算机指令正常运行和停站,实现自动驾驶,司机仅负责开关门,并通过列车内的多种仪表和自我诊断装置监视列车的运行。必要时,也可进行人工驾驶,以双重方式保证列车的安全运行。

ATP是整个ATC系统的安全核心,负责列车间的安全间隔、超速防护及车门控制,主要包括地面(车站与区间)的线路占有信息的传输设备、车载设备。ATP的系统制式有不同分类方式:按控制方式分,有台阶式、曲线式;按传输方式分,有点式、连续式;按闭塞方式分,有固定式、移动式和准移动式。

ATS是ATC系统的上层管理部分,负责监督、控制协调列车运行,自动转换道岔,排列进路,并根据列车运行计划与实际客流等情况合理地调度列车,并使列车响应中央控制室发出的监督命令,实现列车跟踪、中心监视,并与管理信息系统和旅客向导系统接口。ATS系统主要由中央计算机及相关显示、控制与记录设备、可控制的车站道岔及信号的联锁设备构成。ATS不属于安全设备。

ATO需在已装备ATP子系统的条件下使用,负责自动控制列车车速,调整列车运行,形成平滑控制牵引力和制动力的指令,在一定精度范围内对位停车等。它有利于列车节能,并可提高旅客乘坐的舒适度和减轻司机的劳动强度。

各国ATP系统结构略有不同。庞巴迪的Adtranz公司生产的Ebcab900型列车,其ATP系统采用分散式模块结构,通过网络连接,以点式应答方式实现车—地间信息传输;法国CSEE生产的TVM系列ATP系统采用轨道电路+点式应答传输方式实现车—地间的信息传输,采用集中式结构,双机热备,具有较高的可靠性及安全性能,目前正在我国的秦沈线运行的TVM430就是其中一例;德国西门子

公司研制的LZB系统,其最大特点是采用轨面环线方式进行车—地间信息传输;日本的数字ATP则通过轨道电路编码技术实现车—地通信,在个别情况下也采用应答器方式传递车—地信息。欧洲铁路联盟为统一欧洲各国的列车控制系统,于20世纪90年代制定了ETCS标准,在ETCS1级地面设备采用欧标应答器,车载设备采用安全计算机技术。在ETCS2级采用无线的GSM-R的通信技术,形成准移动闭塞或移动闭塞方式控制列车安全运行。

7.2.2 国内行车安全控制技术的发展

机车信号与自动停车、无线列车调度电话作为行车安全的三大件在20世纪80~90年代得到普及,机车与地面的装备率均接近100%,对保障行车安全,防止各种行车突发事件起到了积极作用。但由于自动停车装置安全性能低,只能起辅助的安全防护作用。

我国于20世纪90年代初开始研究行车安全控制技术,成功开发了LKJ-93型列车运行监控记录装置,列车运行监控记录装置简称“监控装置”。1995年起在全路普遍安装和使用,以代替自动停车装置,装备率接近100%。2000年又成功开发了升级产品LKJ2000型监控装置,并于2001年开始推广,实现了对机车超速进行防护,基本消灭了机务引发的列车冒进信号、列车超速导致的险性事故及恶性大事故。

鉴于国内条件,自主开发的监控装置必须与铁路机车信号配合使用。其控制模式采用车载控制模式(即预先将线路数据存储在主机的控制模式)、距离目标一次速度模式曲线或分级速度控制模式曲线控制方案。LKJ-93型采用单套运行,LKJ2000采用双套冗余运行。后者在技术等级、功能、性能和可靠性等方面较前者都有较大程度的提高,尤其是采用图形化屏幕显示技术,可动态显示前方包含弯道、坡道、桥梁、隧道、道岔、信号机布置等线路纵断面信息,实时显示控制曲线,界面直观,方便乘务员操控。LKJ2000及LKJ-93型都设有IC卡输入功能,防止乘务员人工输入列车数据的差错,提高了数据的可靠性和安全性。

为实施对临时施工线路的慢行控制,监控装置设置了IC卡临时揭示控制功能。乘务员在出勤时,地面人员将临时慢行揭示数据通过地面读卡器写入IC卡中,上车后插入显示器传递给监控主机,主机依据相应的时间对指定的上下行及指定的公里标范围进行慢行控制。

监控装置具有记录功能,其记录的数据可通过转储器或IC卡转储到地面微机。在地面微机配有一套完善的分析处理软件,可用作事故原因分析,平时用于乘务员操作违章情况分析。

地面系统除配有地面分析软件外,还配备有一套地面开发软件,其作用是把线路有关控制数据编译成计算机能识别的数据录入微机控制系统,固化到芯片后装在车载监控装置上使用。

铁路的提速对安全性提出了更高的要求,国内厂商正在研究增加点式应答器向列车ATP车载设备传输列车进路信息及线路运行信息,提高控制的安全性。

此外,随着通信技术的发展,铁路专用通信网络GSM-R通信系统也将逐步完善建设起来。基于无线通信技术的列车控制系统也将在未来蓬勃发展。

7.3 机车行车安全装备系统的构成

随着监控装置的普及,铁路行车安全装备也有了较大的发展。铁路机车行车安全装备系统是指装设于机车、动车以及自轮运转的特种设备上,用于直接防止列车运行事故或辅

助机车乘务员提高安全操纵列车运行能力的装备，主要包括列车运行监控记录装置（简称监控装置）、机车安全信息综合监测装置（简称 TAX 装置）、机车信号、列车无线调度通信设备（简称无线列调）以及机车行车设备的状态检测设备等。铁路机车行车安全装备是机车设备的组成部分。

TAX 装置为机车其他检测装置提供了机车坐标的信息平台，并以广播数据的方式向其他设备提供机车的所在公里标、机车速度、车次等信息，为其他检测装置提供检测结果记录、记录时的辅助信息记录的功能。在目前的 TAX 箱中，配备有弓网检测装置、轨道检测装置、走行部检测装置、语音录音装置、TMIS 单元、DMIS 单元、无线传输装置接口等。

弓网检测装置用于在机车运行过程中对弓网状态进行检测。

轨道检测装置用于在机车运行过程中对轨道路面状态进行检测。

走行部检测装置用于在机车运行过程中对机车走行部关键部件（如轴箱轴承、电机轴承、抱轴轴承、传动齿轮和轮对踏面）等状态进行检测。

语音录音装置用于记录机车乘务员与调度、车站的通话内容。

无线传输装置用于车—地信息交互、地面通话等功能，实现车载、地面系统建立无线通信连接。它利用高速无线局域网解决大量非实时信息的传输，利用 GSM/GPRS（预留 GSM-R 接口）解决简短、实时信息的传输。除为监控装置向地面传输记录数据外，同时为 TAX 箱内各单元提供向地面传输数据的通道。

7.4 监控装置的功能

监控装置是中国铁路普遍使用的运行安全设备，它以轨道电路及机车信号设备作为列车运行指令的信息，并将线路数据及机车性能参数预置于主机内，通过设备内 CPU 智能处理，以连续平滑速度变化模式曲线方式实现对列车运行速度的控制，从而实现通常意义的 ATP 功能。

监控装置的主要功能有：

- (1) 防止列车越过关闭的信号机。
- (2) 防止列车超过线路（或道岔）允许速度、机车允许速度、车辆允许速度及其他允许速度中的最低值。
- (3) 防止机车高于规定的限制速度进行调车作业。
- (4) 在列车停车情况下，防止列车溜逸。
- (5) 按揭示命令要求控制列车不超过临时限速。
- (6) 在自动闭塞区段，列车在显示停车的通过信号机前停车 2min 后又继续向此关闭的信号机防护的分区运行时，保证在该信号机防护的分区内列车运行速度不超过规定的限制速度。
- (7) 为适应引导进站、路票发车等特殊行车作业要求，司机能够操作按键有条件地解除部分速度控制功能。
- (8) 监控装置具有运行数据实时记录功能，能够记录日期、时间、里程坐标、机车条件变化、运行状态、按键、检修人员/乘务员输入、系统自检、揭示控制等内容。记录的数据能够通过转储器、IC 卡或无线传输方式转录到地面微机系统中，通过相应的软件进行统计、分析及打印等工作。

(9) 显示及语音提示功能：

1) 通过监控装置的显示器可以显示前方地面信号机的类别、编号；显示列车距前方地面信号机的距离；显示控制速度值和列车实际运行速度值；对配有屏幕显示的设备，能

以曲线、符号和文字形式，沿线路里程的延展显示机车运行前方不少于 3km 以内的线路曲线、坡道坡度、道口、桥梁、隧道设置情况。

2) 通过监控装置的显示器可以进行各类声音报警提示。

7.4.1 监控装置的基本工作原理

监控装置需要获得 3 个方面的信息，即行车指令要求、运行线路状况和列车自身状况，才能良好地完成上述的各项功能。

行车指令要求主要指运行线路占用情况及列车调度所是否允许列车向前运行的指令。速度监控装置通过机车信号获得行车指令要求。

运行线路状况指线路的坡道、曲线、隧道情况以及各种运输设施（车站、道岔、信号机）布置等情况。监控装置通过将机车担当的运行区段的线路和设施等有关参数预先存储于监控装置的主机中获得线路运行状况。

列车自身状况是指编组辆数、机车车辆结构允许的最高速度、列车实际运行速度等。列车编组辆数参数是通过司机用按键输入获得的；运行速度由机车轴端速度传感器得到。

监控装置的主要工作过程是采集列车和线路状态参数，获取运行指令并确定指令目标处的速度控制值，对照指令目标处的速度值计算出列车运行当前必须限定的速度值（限速值），将采集的实际运行速度与限速值进行比较判断，一旦达到限速值，则发出报警，切除牵引或制动等控制指令进行速度控制。监控装置工作过程的核心环节是当前限速值的计算取得。计算的数学模型必须符合 TB/T 1407—1998《列车牵引计算规程》，且要考虑到系统状态参数采集可能存在的误差和列车控制系统结构性能的离散性而包含的安全余量。

沿列车运行线路里程坐标将运行在各处的计算所得限速值加以连接而形成连续曲线。通常，把监控装置计算所得限速值称为监控装置控制模式限速值（或简称为模式限速值、计算限速值）；将此限速值按沿线路里程坐标连成的限速值曲线称为监控装置控制模式限速曲线（简称模式曲线）。模式曲线分为两类：①依据线路设施条件和机车车辆构造条件确定的限速值形成的模式曲线，其在一定区域内是固定不变的，如图 2.2-73 中机车所处的机车信号显示 L 的区域，称为固定模式曲线；②根据前方指令目标处的速度控制值的要求，模式限速值沿线路里程坐标形成渐变下降的曲线，如图 2.2-73 中机车所处的机车信号显示 U 或 H/U 的区域，称为降速模式曲线。

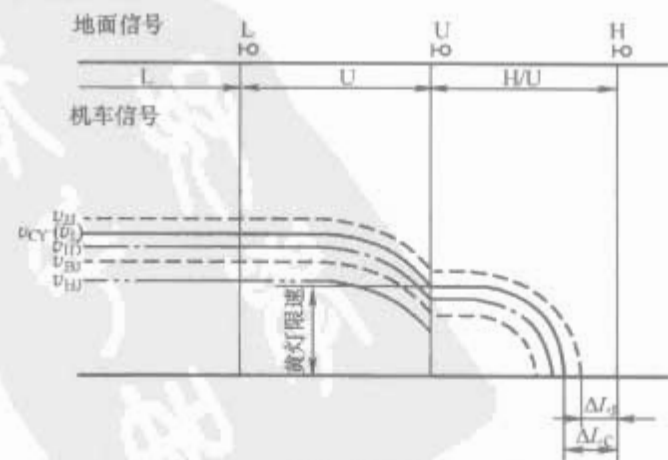


图 2.2-73 监控模式曲线示意图

L—绿灯区；U—黄灯区；H/U—红/黄灯区； v_{LY} —一起动紧急模式曲线； v_{LY} (v_L)—一起动常用制动模式曲线； v_{UJ} —卸载整定值； v_{UJ} —报警整定值； v_{UJ} —缓解模式整定值； ΔL_J —紧急制动预留安全距离； ΔL_C —常用制动预留安全距离

模式曲线是监控装置各控制指令速度值形成的基础。

对于固定模式曲线, LKJ2000 型监控装置依据线路的曲线和坡道、桥梁、隧道、道岔的固定限速要求以及机车车辆的构造限速要求, 直接形成模式曲线。

对于降速模式曲线, 监控装置每个瞬间总是根据前方指令目标处的速度控制值的要求, 分别按照常用制动作用方式数学模型和紧急制动作用方式数学模型计算取得 2 个限速值。一般把按照常用制动作用方式数学模型计算取得限速值形成的限速曲线作为模式曲线; 而对于机车没有电控常用制动机构的, 则把按照紧急制动作用方式数学模型计算取得限速值形成的限速曲线作为模式曲线。

除了常用制动和紧急制动两种监控功能的执行手段外, 监控装置还设置了报警和切除牵引(俗称卸载)控制指令输出信号, 以便在常用或紧急制动执行之前, 提醒乘务员操纵减速或通过切除机车动力实施惰性运行减速, 减少制动排风。此外, 在监控装置实施常用制动并达到了减速要求后, 装置有允许缓解的提示功能。

监控模式设计包括两方面: 一是基本控制功能的设置和相关的制动计算方法; 二是为适应不同运行区段的不同控制要求设置控制参数的赋值方法。设置控制参数的赋值方法将在第 3 章介绍。

7.4.2 各种信号状态基本控制功能设计

各种信号状态基本控制功能按如下规定:

(1) 当机车信号为绿灯条件时, 允许列车按线路最高允许速度或机车、车辆的最大构造速度运行, 监控装置的报警、切除牵引、常用制动(及其允许缓解速度值)、紧急制动速度值均以线路最高允许速度或机车、车辆的最大构造速度为基准进行设置, 见图 2.2-73。

(2) 当机车信号为黄灯(或绿/黄灯、双黄灯)条件时, 监控装置将按保证列车在通过显示黄灯(或绿/黄灯、双黄灯)的信号机时降为其规定的限制速度的要求, 根据 TB/T 1407—1998 规定的常用及紧急制动计算公式进行实时计算, 取得控制指令速度值。

(3) 当列车将要进车站的侧线机车信号显示双黄灯时, 装置根据已存入装置内的进站信号机到相应道岔尖的距离及道岔的限制速度, 以道岔尖为指令目标地点, 实时计算出列车在各点允许运行的速度, 将其设置为限制速度值, 并将岔尖处的限制速度值一直保持, 直至列车尾部通过出站道岔。

(4) 监控装置对局部线路限速的控制与对进车站侧线的控制原理相似, 只是将指令目标地点道岔的限速要求改为局部线路限速要求的起始地点而已, 并且同样将限制速度值一直保持至列车尾部通过终止限速地点。

(5) 当机车信号显示红/黄灯, 即地面信号机关闭时, 监控装置将根据 TB/T 1407—1998 实时进行制动计算, 按保证在关闭信号机前可靠停车设置各点的限制速度。在此信号机前, 模式限制速度将变为零。

7.4.3 安全余量设计

考虑到各种参数采集可能存在的误差和制动机构性能离散性会引起实际制动距离与计算距离发生误差, 为了确保安全, 不论常用制动还是紧急制动, 监控装置均设有一个制动距离安全余量(ΔL), 该值按式(2.2-103)计算, 即

$$\Delta L = S_0 + Kv_0 \quad (2.2-103)$$

式中: S_0 、 K 为常数, 其限值参见下一节中有关内容; v_0 为制动初速度。

假设列车从绿灯进入黄灯再接近红灯区间, 即机车信号依次显示绿灯(L)→黄灯(U)→红/黄(H/U), 监控装置速度控制模式曲线示意图如图 2.2-73 所示。图中: 机车实际速度 $v_h \geq v_{HJ}$ 为语音报警; $v_h \geq v_{HD}$ 为机车卸载; $v_h \geq v_{CY}$ 为常用制动动作值; $v_h \geq v_{HJ}$ 为紧急制动动作值; $v_h \leq v_{HJ}$ 为允许人工缓解装置起动的常用制动, 在 H/U 灯区域一般均设定停车后才能进行人工缓解。

注意: 图中假设监控装置实时计算的模式限制速度曲线 v_L 与常用制动模式曲线重叠。

7.4.4 监控模式计算

(1) 各指令值的形成。一般情况下, 监控装置首先按照一定控制要求根据规定的数学模型计算确定出限速模式值, 再通过与限速模式值的差值关系形成常用制动、紧急制动、报警、切除牵引等实施输出指令值; 而仅在降速模式区域, 监控装置的常用制动控制指令速度值和紧急制动控制指令速度值均分别直接取自常用制动数学模型计算限速值和紧急制动数学模型计算限速值。各差值可通过控制参数赋值法进行设置。

速度差是指实施指令的整定值与监控装置实时计算确定限制速度值 v_L 之间的差值。通常, v_L 直接作为显示器的模式速度值显示。

1) 报警开始速度差 Δv_{HJ} 。 Δv_{HJ} 为计算限制速度 v_L 与报警速度值 v_{HJ} 之间的差值

$$\Delta v_{HJ} = v_{HJ} - v_L \quad (2.2-104)$$

Δv_{HJ} 一般设为小于零, 表示当运行速度接近但低于计算限制速度值时监控装置开始报警。

2) 切除牵引(卸载)速度差 Δv_{HD} 。 Δv_{HD} 为计算限制速度 v_L 与要求惰行速度 v_{HD} 的差值

$$\Delta v_{HD} = v_{HD} - v_L \quad (2.2-105)$$

Δv_{HD} 一般设为小于或等于零, 即当实际运行速度(简称实速)接近常用制动速度时, 在常用制动实施前卸载, 或与常用制动同时卸载动作。

3) 常用制动速度差 Δv_{CY} 。 Δv_{CY} 为计算限制速度 v_L 与常用制动速度 v_{CY} 的差值

$$\Delta v_{CY} = v_{CY} - v_L \quad (2.2-106)$$

Δv_{CY} 一般设为等于或大于零, 即等于或大于模式限速值时装置实施常用制动。

4) 紧急制动速度差 Δv_{HJ} 。 Δv_{HJ} 为计算限制速度 v_L 与紧急制动速度 v_{HJ} 的差值

$$\Delta v_{HJ} = v_{HJ} - v_L \quad (2.2-107)$$

Δv_{HJ} 一般设为等于或大于零, 并且, 因为紧急制动一般发生在常用制动之后, 为了避开常用及紧急 2 条制动曲线相交, 一般设置 $\Delta v_{HJ} > \Delta v_{CY}$ 。

5) 允许缓解速度差 Δv_{HJ} 。 Δv_{HJ} 为计算限制速度 v_L 与允许缓解速度的差值

$$\Delta v_{HJ} = v_{HJ} - v_L \quad (2.2-108)$$

Δv_{HJ} 一般设为小于零, 即实施常用制动后, 当实际运行速度低于限制速度一定值或速度为零时才允许人工缓解。

以上各种速度差值(Δv_{HJ} 、 Δv_{HD} 、 Δv_{CY} 、 Δv_{HJ} 、 Δv_{HJ})在装置的降级控制方式、调车方式和固定模式区、降速模式区、停车模式区可以分别设置不同的值, 以适应各种控制的

需要。具体数值由使用部门根据线路实际情况或乘务员操作方法来设置。

(2) 制动距离计算中的有关参数。根据式 (2.2-41)、式 (2.2-46)、式 (2.2-48), 制动距离的计算公式为

$$S_b = S_k + S_e = \frac{v_0 t_k}{3.6} + \sum \frac{4.17(v_1^2 - v_2^2)}{1000\theta_h \varphi_h + \omega_{bd} + i_j} \quad (2.2-109)$$

考虑监控装置在计算制动距离时需加入安全余量 ΔL , 监控装置计算制动距离的公式实际变为

$$S'_b = S_k + S_e + \Delta L = \frac{v_0 t_k}{3.6} + \sum \frac{4.17(v_1^2 - v_2^2)}{1000\theta_h \varphi_h + \omega_{bd} + i_j} + S_0 + K_0 \quad (2.2-110)$$

上两式中各参数取值方法如下:

1) 空走时间 t_k 。按式 (2.2-42) ~ 式 (2.2-45) 计算, 其中 n 按乘务员输入的牵引辆数来算 (如乘务员无输入辆数, 则按该牵引区段最高辆数取值), γ 由设置的常用制动列车管减压量来取值, i_j 由线路参数中的实际坡度来折算。

2) 制动初速 v_0 。按制动时的实际初速度取值。

3) 紧急制动换算制动率 θ_h 。

普通旅客列车

$$\theta_h = 0.58 (\text{中磷闸瓦}) \quad (2.2-111)$$

货物列车

$$\theta_h = 0.28 (\text{列车管定压 } 500\text{kPa 时}) \quad (2.2-112)$$

$$\theta_h = 0.30 (\text{列车管定压 } 600\text{kPa 时}) \quad (2.2-113)$$

盘形制动快速旅客列车

$$\theta_h = 0.32 (\text{高摩合成闸片}) \quad (2.2-114)$$

4) 常用制动换算制动率 θ_{hc} 。根据《列车牵引计算规程》计算公式 $\theta_{hc} = \theta_h \beta_b$, 则

旅客列车

$$\theta_{hc} = 0.58 \beta_b \quad (2.2-115)$$

货物列车

$$\theta_{hc} = 0.28 \beta_b (\text{列车管定压 } 500\text{kPa}) \quad (2.2-116)$$

$$\theta_{hc} = 0.30 \beta_b (\text{列车管定压 } 600\text{kPa}) \quad (2.2-117)$$

式中: β_b 为常用制动系数, 在《列车牵引计算规程》中查表取值。

5) 换算摩擦系数。按《列车牵引计算规程》进行计算和取值。

6) 列车单位基本阻力 ω''_0 。旅客列车按本章 1.1.5 节相关公式计算并取值; 货物列车按本章 1.1.5 节相关公式的重车考虑计算并取值。

7) 安全预留距离 S_0 。 S_0 的设置可分别按客车、货车、常用制动、紧急制动、普通站、关键站、区间、站内等设置不同的值, 由使用部门据其线路实际情况取值。

$$\text{一般站} \quad S_0 = 20 \sim 50\text{m} \quad (2.2-118)$$

$$\text{关键站} \quad S_0 = 10 \sim 30\text{m} \quad (2.2-119)$$

8) 安全距离速度项系数 K_0 。一般取 $K_0 = 0.5$ 。

(3) 各种限速要求取值。有以下几种:

1) 一般线路限速。由固定的线路允许速度或机车、车辆构造速度决定。在地面数据中客货车可以分别取值, 一般取线路限速或机车车辆构造限速的最小值。

2) 局部线路限速。指由于长期施工慢行或桥梁、隧道等形成的对某区段的特殊限制速度。在地面数据中按始末公里标决定限速地段并按要求取值。

3) 进/出站道岔限速。按各股道的进/出站道岔限制速度要求取值。

4) 站内黄灯限速。按进站信号机处的黄灯限制速度值决定取值。

5) 区间黄灯限速。由各路局根据需要规定。

6) 调车限速。按各路局对调车限速的规定协调, 一般取 40km/h。

7) 引导进站限速值。按《铁路技术管理规程》规定取 20km/h。

8) 《铁路技术管理规程》235 条限速值。按规定取 20km/h。

(4) 解锁速度、距离。对监控装置解除模式控制 (俗称解锁) 时的运行速度限制及距前方信号机距离限制, 由使用部门根据各种解锁要求、线路条件、乘务员操作方法等情况规定。

8 轨道交通机车车辆电气试验

任何类型的轨道交通机车车辆, 在新产品开发或者老产品有重大技术改进后, 在进入应用之前, 都必须按规定的程序进行各种试验, 通过试验或测量得到的各种性能参数, 来校核是否与设计任务书提出的要求值相符, 或评价其是否满足投入线路应用的条件。在轨道交通范畴内, 从电力机车、电传动内燃机车、动车组、城轨列车以及磁浮列车, 对于每种产品都会制定专用的试验规程和试验方法。本节根据 IEC1133-1992 择其有代表意义的, 而且主要是电气系统方面, 有重点地原则性地加以介绍。

8.1 试验分类和实施方式

8.1.1 总则

各种轨道交通车辆在组装前, 各个部件取得型式试验合格后才能装车, 整车组装后投入使用前, 必须进行各种试验:

(1) 调整试验。在验收试验之前, 厂家在工厂内进行的调整试验, 包括静置或线路试验。

(2) 验收试验。包括:

1) 型式试验。原则上对给定设计的单台车进行。

2) 例行试验。对每台车都要进行。

(3) 研究性试验。为了获得补充资料而进行的选择性的特殊试验, 仅当合同有规定时方可进行。通常研究性试验的结果, 不可作为拒绝接收轨道交通机车车辆产品的理由。

8.1.2 验收试验

(1) 型式试验项目见表 2.2-28 和表 2.2-29。进行型式试验的期限应由双方议定。仅当合同有规定时, 方可要求做选择性型式试验。

(2) 例行试验项目同样见表 2.2-28 和表 2.2-29。例行试验的结果宜考虑验收的允差, 但不得比型式试验结果差。

8.1.3 试验实施方法

试验的性质和场所, 在签订合同时就达成协议, 包括下列内容:

(1) 试验程序。

(2) 工厂内静置试验项目。

(3) 用户希望在自己系统上进行的线路试验项目和条件。

(4) 环境条件 (随季节变化)。

(5) 某些部件在厂内试验由于相应试验设备的不足, 要求在整车试验时补做的项目。

静置试验和线路试验项目分别见表 2.2-28 和表 2.2-29。

表 2. 2-28 静置试验项目

试 验 项 目	IEC61133 标准条款		
	例行试验	型式试验	研究性试验
静置机械试验		5. 2	
间距	5. 2. 1		
称重试验	5. 3	5. 3	
压缩空气设备全面气密性和运转试验	5. 4	5. 4	
静置制动试验	5. 5	5. 5	
绝缘试验	5. 6	5. 6	
成套设备正常操作试验	5. 7	5. 7	
接地和回流电路接线的检查	5. 8	5. 8	
辅助电气设备和辅助电源的运行试验		5. 9	
旋转方向等	5. 9. 3		
起动试验	5. 9. 4		
蓄电池充电设备的检查	5. 10. 3	5. 10	
热力发动机和有关的发电机组的检查	5. 11	5. 11	
车体和外部设备箱体的密封试验		5. 12	
最初检查			
开孔与孔盖			
过滤器等的安装	5. 12. 1		
安全措施的检查	5. 12. 4	5. 13	
	5. 12. 6		
工作条件和舒适度的检查	5. 13	5. 14	
车外的噪声等级		5. 14. 3(选项)	
压力冲击		5. 14. 4(选项)	
安全设备试验	5. 15	5. 15	
冲击耐压试验			5. 16

表 2. 2-29 线路试验项目

试 验 项 目	IEC61133 标准条款		
	例行试验	型式试验	研究性试验
运行安全和舒适度试验		6. 1	
弯道和坡道多变线路的运行试验		6. 2	
受电器试验(导电轨受电靴或受电弓)		6. 3	
受电器的动作	6. 3. 1		
起动和加速试验		6. 4	
牵引力/速度特性	6. 4. 2		
线路制动试验		6. 5	
总则	6. 5. 1		
制停距离	6. 5. 4		
电制动			
平滑转换	6. 5. 9g)		
平稳施加	6. 5. 9h)		
供电网断电	6. 5. 9f)		
速度控制和自动列车保护系统试验	6. 6	6. 6	
干扰试验		6. 7	
牵引能力和制动能力试验		6. 8	
运行阻力试验			6. 9
能耗试验			6. 10
典型运行图的检查		6. 11(选项)	
供电中断和电压突变试验		6. 12(选项)	
过载装置动作正确性试验		6. 13(选项)	
内部过电压水平的检查			6. 14

8. 2 电力机车和动车的试验

参照 IEC61133—1992, 我国铁道部又考虑电力机车和
内燃机车的各自特点, 分别制定了电力机车和内燃机车制成
后投入应用前的标准, 城建部也制定了城市轨道交通车辆组

装后的检查与试验规则, 甚至某个城市地铁的某号线用地铁
车辆的招标书中都规定了具体的车辆验收试验的条款。这
里, 只针对内燃机车增加了柴油机综合试验; 针对城市地铁
车辆增加了车厢内乘客的环境安全试验项目等。

8. 2. 1 电力机车的例行试验

电力机车的例行试验包括无电状态下的整备检查和机车
低压试验、绝缘介质强度试验、机车高压试验、列车供电系
统试验、机车空气管路及制动机系统性能试验以及其他例行
试验。

8. 2. 1. 1 低压试验

机车未接入 25kV 时, 在低压状态下开闭各种开关检查
各种继电器、接触器、转换开关、受电弓升降等的动作状
态。排除施工中错接或电器不良件。

8. 2. 1. 2 绝缘介质强度试验

在进行高压试验之前, 对机车 25kV 侧电路、牵引绕组
整流电路、牵引电动机电路、辅助电路、控制电路等对地施
加工频耐压试验, 以检查各个电路对地的绝缘强度是否达到
标准。各施加工频耐压依据有关标准计算确定, 并制定厂内
规程执行。

SS₈ 型电力机车的耐压试验值见表 2. 2-30。

表 2. 2-30 SS₈ 型电力机车耐压试验

被试电路	参考绝缘电阻	工频耐压
一次侧电路(25kV 电路) 对地试验	2. 5kV 绝缘电 阻表, ≥100MΩ	受电弓、绝缘子: 75kV, 1min 25kV 电路: 取 85% 为 64kV, 1min
牵引绕组、整流电路 (AC1374V)	2. 5kV 绝缘电 阻表, ≥3MΩ	4. 6kV, 1min
牵引电动机回路 (DC1000V)	2. 5kV 绝缘电 阻表, ≥2MΩ	3. 8kV, 1min
辅助电路(AC380V)	0. 5kV 绝缘电 阻表, ≥0. 5MΩ	1. 5kV, 1min
控制电路(DC110V)	0. 5kV 绝缘电 阻表, ≥0. 5MΩ	700V, 1min

注 判断标准为施加电压 1min, 无击穿闪络为合格。

8. 2. 1. 3 机车高压试验

在升受电弓, 接入 25kV 接触网电压下进行试验, 顺序
如下:

- (1) 升弓试验。查看升弓、降弓的动作和网压表的指示。
- (2) 合主断路器。查看断路器合闸后的相应显示及控制电压随着充电而升高数值。
- (3) 劈相机起动。
- (4) 压缩机、“强泵”、牵引电动机风机的电动机、制动电阻风机的电动机单独起动以及辅机自动顺序起动。
- (5) 低级位给电流 2~3 级, 电动机电流表 240~360A。
- (6) 电制动励磁。
- (7) 空载试验。牵引电动机隔离开关在隔离位, 整流装置接入试验空载电阻, 调节调速手柄, 牵引电动机电压上升至最大限制值。
- (8) 按“紧急制动”按钮, 紧急制动作用, 主断路器跳闸。
- (9) “接地”保护试验。
- (10) 低速动车试验, 以小于 20km/h 速度看所有电压表、电流表的指针转向是否正常, 运行方向与手柄位置是否符合。

8.2.1.4 例行试验

(1) 调压整流系统母线检查。以 1000V 低压施加于牵引变压器 AX 端，看各二次绕组的电压值，查看匝比正常与否。

(2) 机车库内动车，检查库内插座的正确性。

(3) 安全联锁装置试验。

(4) 机车试运。在 25kV 工频供电试运线上，进行试验要求如下：

1) 试运里程小于 100km。包括牵引负载半功率以上(540~1000A) 运行不少于 20km；制动负载不小于 20km 和高速(100~120km/h) 不少于 45km。

2) 牵引工况基本要求。满足准恒速限流特性；观察电动机负荷分配基本均匀，各牵引电动机电流值小于或等于 5%；具有准恒速特性。

3) 制动工况。检查最大制动励磁电流限制；级位准恒速特性及制动电流限制特性。

4) 一般运行要求。机车起动、运行、停车、牵引、制动等各种工况下，各部件运行正常，无异常振动情况发生；试运完后，轴箱体温升小于 30℃；各齿轮箱无漏、窜油现象。

8.2.2 型式试验

电力机车型式试验在铁道部机车辆检测中心（北京环形铁道试验段）进行。通常在进行调整试验后进行，试运行里程最大为 5000km。

型式试验的内容在 GB 3318—2006《电力机车制成后投入使用前的试验方法》中有详细规定，本节重点介绍与电气系统比较密切的内容。

(1) 受电弓试验。电力机车受流性能对运行可靠性十分重要，在例行试验时速度比较低，因此型式试验中除了对受电弓静置性能试验外，还要在满载并全程速度内进行记录受电弓离线率的测试。

(2) 辅机系统试验。检查在电网电压规定的上、下限值时劈相机的正常起动和辅机正常工作与否。

(3) 内部和外部过电压试验。模拟雷击过电压和操作过电压检查过电压吸收装置的作用。

(4) 机车功率试验。在机车额定网压和额定负载（牵引和电气制动）下，测定各主要部件的温升是否满足设计要求。

(5) 功率因数和谐波电流的测量。

(6) 机车、动车的加速性能试验，客运机车和动车组对起动加速度有特定的要求。

(7) 控制系统抗干扰试验。检查电磁兼容性能能否满足电气化铁道运行要求。

(8) 安全设备试验、空气制动试验、事故预防性试验、动力学性能试验、机车强度试验、重联运行试验、电气制动试验、牵引性能及运行阻力测定、滤尘效果、撒砂装置试验都有规定。

电力机车试验简明表见表 2.2-31。

表 2.2-31 电力机车试验简明表

试 验 项 目	试验类别
一般性检查 M	S* T
受电弓试验 M	ST
介质试验 M	ST
事故预防措施 M	ST
安全设备试验 M	S* T
控制电源及蓄电池充放电试验	T
振动参数测试	T
辅助机组的试验	T
机车调速	T
主电路短路与过载保护和机车控制系统试验	T
内部和外部过电压试验	T
机车功率试验	T
功率因数效率和谐波电流试验	T
起动加速试验	T
牵引性能及运行阻力试验	T
电制动试验	S* T
动力学性能试验	T
重联运行试验	T
司机室工作条件检查	S* T
例行试验中的线路试运行	S
线路运用考核试验	

注 S—例行试验；S*—简化例行试验；T—型式试验；M—可以在组装厂内进行。



第 3 章 牵 引 电 气 设 备

1 牵引变压器

1.1 技术等级分类

我国牵引变压器(以下简称变压器)的设计及工艺技术划分为 6 个技术等级,见表 2.3-1。

表 2.3-1 牵引变压器技术等级分类

代表车型变压器	主要技术特点
SS ₁ 电力机车 TBQ1 型变压器	与引燃管、二极管整流器配套;适用于调压开关电压调节;变压器车内安装,用铜管冷却器冷却
SS ₂ 电力机车变压器、SS ₃ 电力机车用 TBQ3 变压器、SS ₆ 电力机车变压器、SS _{3B} 电力机车变压器、“春城”号	与晶闸管整流器配套;变压器车内安装;铜管冷却器冷却;SS ₂ 变压器采用壳式变压器技术
SS ₄ 系列改型电力机车变压器、SS _{6B} 电力机车变压器、SS ₇ 系列机车变压器、SS ₈ 系列机车变压器、昆明动车组变压器	变压器适用于相控技术;用全铝合金冷却器冷却;变压器采用线圈导向冷却;变压器与平波电抗器采用一体化结构、轻量化设计;SS ₇ 系列机车变压器采用壳式变压器技术
SS ₉ 电力机车变压器,模块化 SS _{7E} 机车变压器	变压器适用于相控技术;采用全铝合金油冷却器;线圈导向冷却;变压器与平波电抗器、滤波电抗器一体化结构;轻量化设计;优化设计;一体化线圈;油箱等采用有限元分析;卧式变压器;变压器车下安装
“蓝箭”、“先锋”号、“中华之星”、“中原之星”、“天梭”号动车组,奥星、九方、出口哈萨克斯坦电力机车变压器	变压器适用于交—直—交变流器系统;全铝合金油冷却器;线圈导向冷却;变压器与电抗器一体化结构;轻量化设计;卧式变压器;变压器为车下安装
出口乌兹别克斯坦电力机车变压器、DJ ₁ 电力机车变压器、DJ ₄ 电力机车变压器	变压器适用于交流传动技术;全铝合金油冷却器;线圈导向冷却;有限元分析;变压器与滤波电抗器一体化结构;轻量化设计;为侧立式变压器或者车下安装

1.2 主要产品

1.2.1 SS_{3B} 型电力机车变压器

1.2.1.1 基本参数

型号: TBQ3B-7000/25。
额定容量(kVA): 6700/6365, 320, 5, 140。
额定电压(V): 25000/(1071+1071)×2, 397, 218, 198。
额定电流(A): 265/1485, 805, 20, 700。

质量(kg): 12500。
外形尺寸(mm): 1735×1620×2984。

1.2.1.2 接线原理图

本变压器将 25kV 接触网电压变换为电力牵引所需的各种电压,接线原理见图 2.3-1。

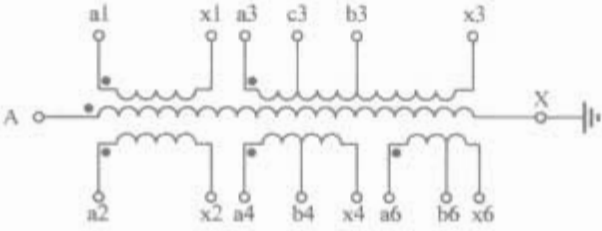


图 2.3-1 接线原理图

1.2.2 SS₄ 改型电力机车变压器

1.2.2.1 基本参数

型号: TBQ8-4923/25。
额定容量(kVA): 4923/1168.25×4, 250, 22.6, 87.6。
额定电压(V): 25000/(695.4+695.4)×2, 399.86, 226, 104.3。
额定电流(A): 196.92/1680, 625, 100, 840。
质量(kg): 13190。
外形尺寸(mm): 2830×1900×3186。

1.2.2.2 接线原理图

本变压器将 25kV 接触网电压变换为电力牵引所需的各种电压,接线原理见图 2.3-2。

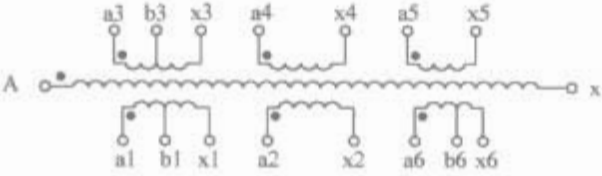


图 2.3-2 接线原理图

1.2.3 SS_{6B} 型电力机车变压器

1.2.3.1 基本参数

型号: TBQ7-7324/25。
额定容量(kVA): 7324/1752.75×4, 313, 22.5, 103。
额定电压(V): 25000/(695.5+695.5)×2, 388.7, 225, 122.7。
额定电流(A): 292.96/2520, 805, 100, 840。
质量(kg): 13800。
外形尺寸(mm): 2725×1795×3324。

1.2.3.2 接线原理图

本变压器将 25kV 接触网电压变换为电力牵引所需的各种电压,接线原理见图 2.3-3。

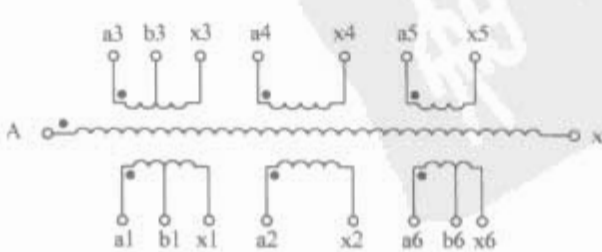


图 2.3-3 接线原理图

1.2.4 SS₇型电力机车变压器

1.2.4.1 基本参数

型号: JDFP-7700/25。

额定容量(kVA): 7280, 4×1719, 2×400, 2×36, 320, 12。

额定电压(V): 25000, 2×619.4, 2×1492.1, 2×168.9, 394.1, 225.2。

额定电流(A): 291.2, 2775, 268.1, 213.1, 812, 53.5。

质量(kg): 16200。

外形尺寸(mm): 3730×2885×1900。

1.2.4.2 接线原理图

接线原理图同SS₄改型电力机车变压器, 见图2.3-2。

1.2.5 SS₈型电力机车变压器

1.2.5.1 基本参数

型号: TBQ9B-5816/25。

额定容量(kVA): 6799/2664.6, 88.9, 220/22.9, 580×2。

额定电压(V): 25000/(686.8+686.8)×2, 91.6, 389/229, 870×2。

额定电流(A): 271.96/1940, 970, 565.6/100, 667。

质量(kg): 13000。

外形尺寸(mm): 2630×1900×3233。

1.2.5.2 接线原理图

本变压器将25kV接触网电压变换为电力牵引所需的各种电压, 接线原理见图2.3-4。

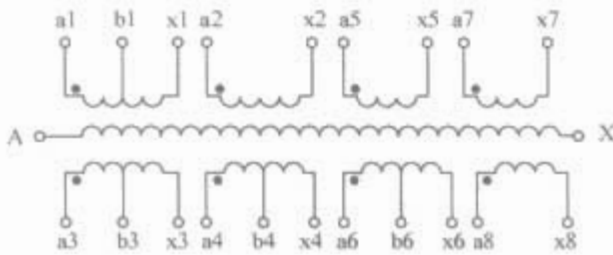


图 2.3-4 接线原理图

1.2.6 独立通风SS₉电力机车变压器

1.2.6.1 基本参数

型号: TBQ19-8668/25。

额定容量(kVA): 8668/3585×2, 314.7/22.9, 99.6, 580.3×2。

额定电压(V): 25000/(686.8+686.8)×2, 870/389/229, 114.5, 869.9。

额定电流(A): 346.7/2610, 362/809/100, 870, 667。

质量(kg): 15416。

1.2.6.2 接线原理图

本变压器将25kV接触网电压变换为电力牵引所需的各种电压, 接线原理见图2.3-5。

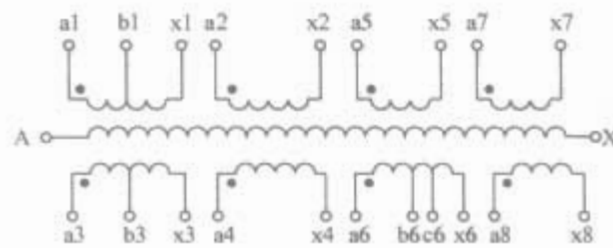


图 2.3-5 接线原理图

1.2.7 “蓝箭”动力车变压器

1.2.7.1 基本参数

型号: TBQ15-6952/25。

额定容量(kVA): 6952/1433×4, 200, 20, 500×2。

额定电压(V): 25000/1471×4, 858, 225, 858×2。

额定电流(A): 278/974, 233, 88.8, 583。

质量(kg): 11358。

外形尺寸(mm): 1735×1620×2984。

1.2.7.2 接线原理图

本变压器将25kV接触网电压变换为电力牵引所需的各种电压, 接线原理见图2.3-6。

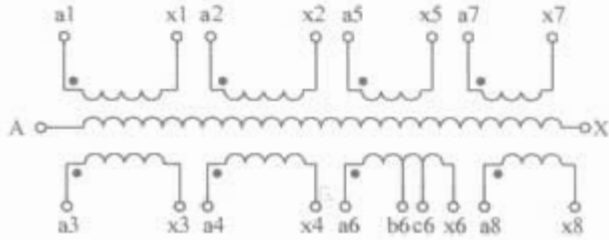


图 2.3-6 接线原理图

1.2.8 “中原之星”动车组变压器

1.2.8.1 基本参数

型号: TBQ17-2148/25。

额定容量(kVA): 2148/468.6×4, 280。

额定电压(V): 25000/790×2, 860。

额定电流(A): 85.92/591×2, 325.6。

质量(kg): 5000。

外形尺寸(mm): 1940×2375×820。

1.2.8.2 接线原理图

本变压器将25kV接触网电压变换为电力牵引所需各种电压, 接线原理见图2.3-7。

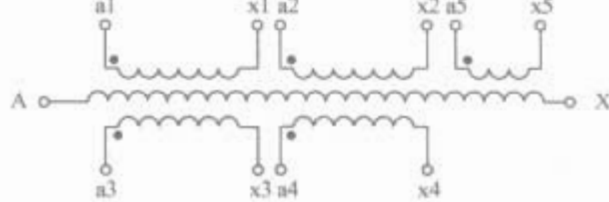


图 2.3-7 接线原理图

1.2.9 “中华之星”动车组变压器

1.2.9.1 基本参数

型号: TBQ20-6452/25。

额定容量(kVA): 6452/1433×4, 200, 20, 500。

额定电压(V): 25000/1471×4, 858, 225, 858。

额定电流(A): 258/974, 233, 88.8, 583。

质量(kg): 10425。

外形尺寸(mm): 3100×2284×1204。

1.2.9.2 接线原理图

本变压器将25kV的接触网电压变换为电力牵引所需的各种电压, 接线原理见图2.3-8。

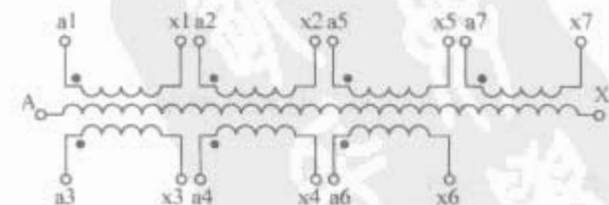


图 2.3-8 接线原理图

1.2.10 出口哈萨克斯坦电力机车变压器

1.2.10.1 基本参数

型号: TBQ22-7492/25。

额定容量(kVA): 7492/1433×4, 160, 100, 1500。

额定电压(V): 5000/1471×4, 340, 220, 3000。

额定电流(A): 299.68/974, 470.6, 454, 500。

质量(kg): 10130。

外形尺寸(mm): 3100×2404×1204。

1.2.10.2 接线原理图

本变压器将 25kV 接触网电压变换为电力牵引所需的各电压, 接线原理见图 2.3-9。

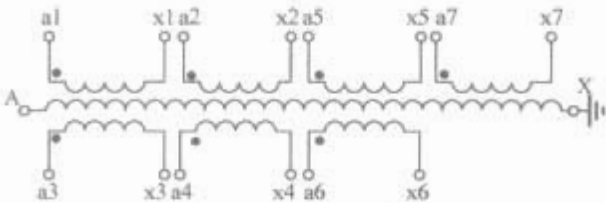


图 2.3-9 接线原理图

1.2.11 出口乌兹别克斯坦电力机车变压器

1.2.11.1 基本参数

- 型号: TBQ21-8216/25。
- 额定容量(kVA): 8216/1111×6, 320, 30, 1200。
- 额定电压(V): 25000/1285×6, 343, 214, 2999。
- 额定电流(A): 329/864.6, 933, 140, 400。
- 质量(kg): 12300。
- 外形尺寸(mm): 3068×1100×2251。

1.2.11.2 接线原理图

本变压器将 25kV 接触网电压变换为电力牵引所需各种电压, 接线原理见图 2.3-10。

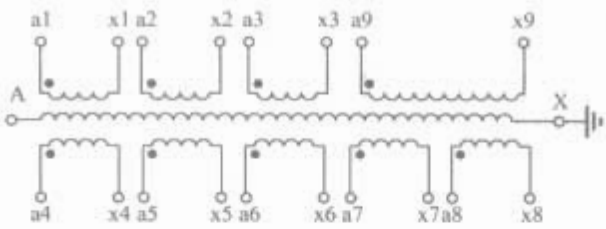


图 2.3-10 接线原理图

1.2.12 “春城”号电动车组变压器

1.2.12.1 基本参数

- 型号: TBQ15-1403/25。
- 额定容量(kVA): 1403, 572.4, 143.1, 286.2, 254.4。
- 额定电压(V): 25000, 636, 159, 318, 848。
- 额定电流(A): 56.1, 900, 900, 900, 300。
- 质量(kg): 3632。
- 外形尺寸(mm): 2423×2317×1132。

1.2.12.2 接线原理图

本变压器将 25kV 接触网电压变换为电力牵引所需的各电压, 接线原理见图 2.3-11。

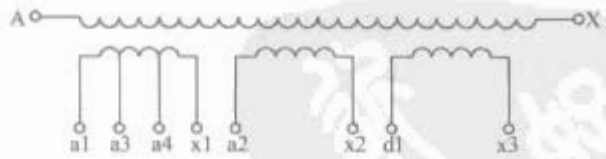


图 2.3-11 接线原理图

1.3 基本原理及分类

1.3.1 主要性能参数

变压器主要性能参数有:

- (1) 额定容量 S_N 。额定容量是变压器的额定视在功率, 以伏安(VA)、千伏安(kVA)或兆伏安(MVA)表示。由于变压器效率高, 通常把一次、二次侧的额定容量设计得相等。
- (2) 额定一次及二次电压 U_{1N} 和 U_{2N} 。以伏(V)或千伏(kV)表示, 按规定, 二次额定电压 U_{2N} 是当变压器一次侧外加额定电压 U_{1N} 时的二次空载电压。

(3) 额定一次及二次电流 I_{1N} 和 I_{2N} 。根据额定容量和额定电压算出的线电流称为额定电流, 以安(A)表示。

$$\left. \begin{aligned} I_{1N} &= \frac{S_N}{U_{1N}} \\ I_{2N} &= \frac{S_N}{U_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (2.3-1)$$

(4) 额定频率。额定频率以 Hz 表示, 我国电网规定为 50Hz。但是, 欧洲一些国家规定为 16.7Hz, 日本及美国等国家规定为 60Hz。

此外, 变压器的主要性能参数还有相数、短路阻抗、额定效率、空载损耗、负载损耗等。

1.3.2 变压器的空载运行

变压器的一次绕组接上电源, 而二次绕组开路时的工作状态称为空载运行。

1.3.2.1 电动势和变比

电动势和磁通的相位关系如图 2.3-12 所示, 电动势 E_1 和 E_2 都比 Φ_m 滞后 90° 。

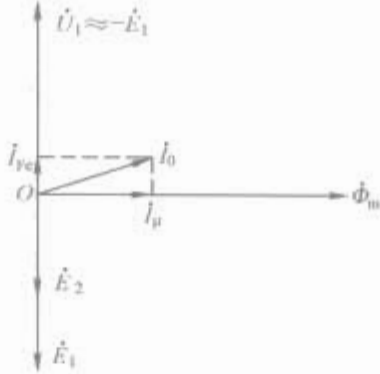


图 2.3-12 空载时各物理量之间的相位关系

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4.44 f w_1 \Phi_m \\ E_2 &= 4.44 f w_2 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (2.3-2)$$

式中: Φ_m 为主磁通的幅值, 当 Φ_m 的单位为 Wb 时, 电动势的单位为 V。

式(2.3-2)表明, 一次、二次绕组内感应电动势的有效值与主磁通的幅值、线圈匝数、磁通交变的频率成正比。

当变压器接到额定频率的电网上运行时, 由于 f 和 w_1 (w_2) 均为常值, 故电动势 E_1 (E_2) 的大小仅由磁通 Φ_m 所决定。如上所述, 当空载运行时, 可以近似地认为仅由外施电压 U_1 的大小来确定。

在变压器中, 一次电动势 E_1 和二次电动势 E_2 之比称为变压器的变比, 用 K 表示, 即

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (2.3-3)$$

1.3.2.2 等效电路

变压器在空载运行时, 可以用一个纯电路形式的等效电路直接表示变压器中电和磁的相互关系, 如图 2.3-13 所示。运用折算法也能用一个纯电路形式的等效电路来直接表示变压器负载运行时一次、二次侧以及一次、二次侧之间电和磁的相互关系。

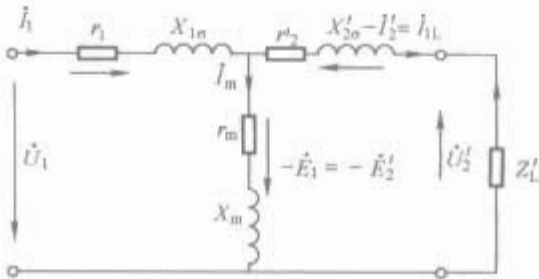


图 2.3-13 变压器 T 形等效电路

从变压器一次侧所接的电网来看, 变压器只不过是整个供电系统中的一个元件。有了等效电路, 就很容易用一个等效阻抗接在电网上来代替整个变压器及其所带负载。

在变压器中, 由于 I_m 在 I_{1N} 中所占的比例很小, 在工程实际中可以将励磁支路移至电源侧, 如图 2.3-14 所示。忽略 I_m , 即去掉励磁支路, 而得到一个更简单的串联电路, 称为变压器的简化等效电路, 如图 2.3-15 所示。

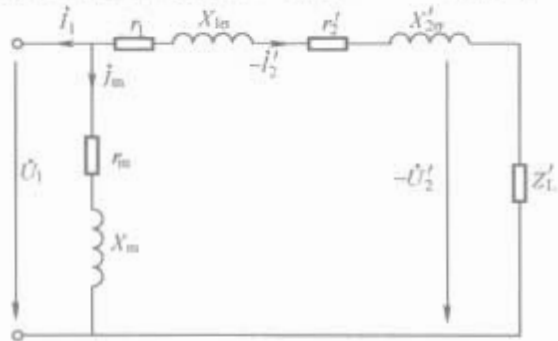


图 2.3-14 变压器的近似 T 形等效电路

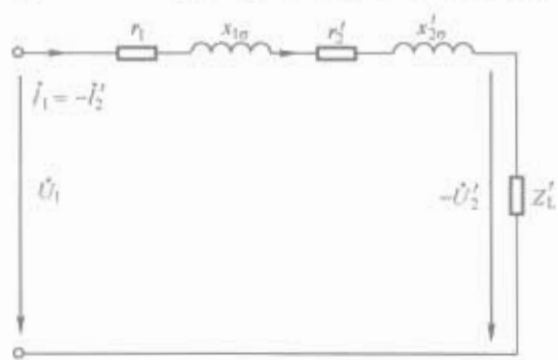


图 2.3-15 变压器的简化等效电路

在 T 形等效电路和简化等效电路中, 可将一次、二次侧的参数合并起来, 得到

$$r_k = r_1 + r_2' \tag{2.3-4}$$

$$x_k = x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' \tag{2.3-5}$$

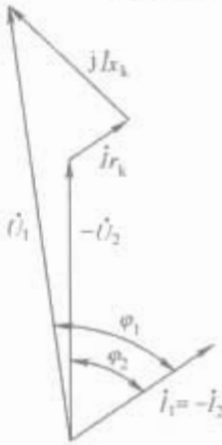
$$Z_k = r_k + jx_k = Z_1 + Z_2' \tag{2.3-6}$$

式中: Z_k 为变压器的短路阻抗; r_k 为短路电阻; x_k 为短路电抗。

与简化等效电路对应的简化相量图如图 2.3-16 所示, 相应的电压方程式为

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(r_k + jx_k) - \dot{U}_2' = \dot{I}_1 Z_k - \dot{U}_2' \tag{2.3-7}$$

从简化等效电路可见, 如果变压器发生稳定短路, 则短路电流 $I_k = U_1 / Z_k$, 这个电流很大, 可达额定电流的 10~20 倍。



基本方程式、等效电路和相量图是分析变压器运行的 3 种方法。基本方程式概括了变压器中的电磁关系, 而等效电路和相量图是基本方程式的另一种表达形式, 因此, 三者之间是一致的, 但究竟取哪一种表达形式, 视具体情况而定。进行定量计算时, 等效电路比较方便; 讨论各物理量之间的大小和相位关系时, 相量图比较直观。

1.4 变压器结构及主要部件

变压器主要由铁心、绕组、油箱、绝缘套管、冷却系统等部件组成。图 2.3-17 所示为具有代表性的 SS₄ 改型电力机车变压器结构图。铁心和绕组是变压器进行电磁感应的基本部分, 称为器身; 油箱起机械支撑、冷却散热和保护作用; 油起冷却和绝缘作用; 套管主要起绝缘作用。

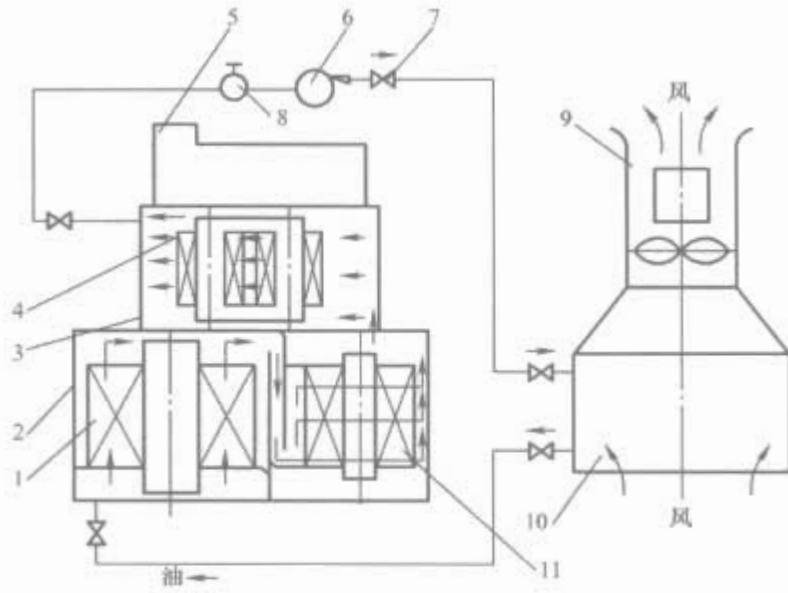


图 2.3-17 SS₄改型电力机车变压器结构
1—变压器器身; 2—变压器下油箱; 3—变压器上油箱; 4—滤波电抗器; 5—储油柜; 6—潜油泵; 7—蝶阀; 8—油流继电器; 9—通风机; 10—油冷却器; 11—平波电抗器

1.4.1 铁心

1.4.1.1 结构

铁心是变压器的磁路部分, 也是变压器支撑绕组、引线系统及绝缘系统的重要结构部件。为了降低铁心内的涡流损耗, 铁心通常用厚度为 0.2~0.35mm、表面涂绝缘涂层的取向硅钢片制成。几种常用的电力机车和动车组变压器国产硅钢片的主要性能数据及其与国外比较见表 2.3-2 和表 2.3-3。铁心柱上套绕组, 铁轭将铁心柱连接起来, 使之形成闭合磁路, 如图 2.3-18 所示。

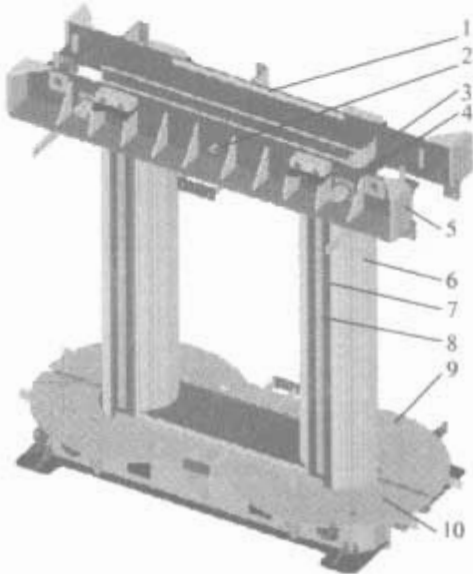


图 2.3-18 铁心装配图
1—夹件油道; 2—铁轭螺栓; 3—低压侧上夹件; 4—方铁; 5—高压侧上夹件; 6—铁心; 7—夹板绝缘; 8—铁心夹板; 9—低压侧下夹件; 10—高压侧下夹件

表 2.3-2 国产硅钢片主要性能数据

牌号	标称厚度(mm)	密度(kg/dm ³)	铁损(W/kg)				最小磁感强度(T)	最小叠片因数(%)
			P _{1.5/50}	P _{1.7/50}	P _{1.5/60}	P _{1.7/60}		
30QG105	0.3	7.65	0.76	1.03	1.02	1.35	1.92	95.5
30QG110			0.78	1.05	1.04	1.39	1.91	
30QG120			0.82	1.15	1.08	1.51	1.90	
30Q120			0.84	1.15	1.12	1.51	1.85	
30Q130			0.86	1.24	1.14	1.63	1.84	
30Q140			0.91	1.34	1.2	1.75	1.82	
30Q150			0.97	1.44	1.26	1.85	1.81	

注 1. 30Q130 硅钢片的直流磁化曲线如图 2.3-19 所示。
2. 30Q140 硅钢片的直流磁化曲线如图 2.3-20 所示。

取向电工钢带国内外标准对照表

厚度 (mm)	中 国			日 本			德 国			美 国			俄 罗 斯			韩 国		
	GB/T 2521—1996			NSC			DIN46400P.3			ORISI			ASTM A876/A876M-96			GOST21427.1		
	最大铁损 $P_{L7/50}$ (W/kg)	最小磁感 应强度 B_{800} (T)	牌 号	最大铁损 $P_{L7/50}$ (W/kg)	牌 号	最大铁损 $P_{L7/50}$ (W/kg)	最大铁损 $P_{L7/50}$ (W/kg)	牌 号	牌 号	最大铁损 $P_{L7/50}$ (W/kg)	牌 号	牌 号	最大铁损 $P_{L7/50}$ (W/kg)	牌 号	牌 号	最大铁损 $P_{L7/50}$ (W/kg)	最大铁损 $P_{L7/50}$ (W/kg)	最小磁感 应强度 B_{100} (T)
0.23			23ZH90	0.90	23RGH090	0.90		ORSTH90L		0.90								
			23ZH95	0.95	23RGH095	0.95										23PH125	0.95	1.87
			23ZH100	1.00	23RGH100	1.00		ORSIH095	M-OH	1.00						23PH132	1.00	1.89
								ORSIH099	M-1	1.06								
			23ZH110	1.10				ORSIH109	M-2	1.12								
0.27								ORSI080	M-3	1.18								
			27ZH95	0.95				ORGIH095L		0.95						27PH125	0.95	1.88
	1.00	1.85	27ZH100	1.00	27RGH100	1.00			M-OH	1.03						27PH132	1.00	1.88
	1.10	1.85	27ZH110	1.10	27RGH110	1.10		ORGIH097	M-1H	1.09						27PH145	1.10	1.88
								ORGIH103		1.03								
0.30	1.20	1.78	27ZH120	1.20	27RGH120	1.20			M-3	1.21						27PH158	1.20	1.80
	1.30	1.78	27ZH130	1.30	27RGH130	1.30	VM-130-27S	ORSI083	M-4	1.27						27PH172	1.30	1.80
	1.40	1.75					VM-89-27N	ORSI089		1.40								
			30ZH100	1.00				ORSIH100		1.00						30PH132	1.00	1.88
			30ZH105	1.05	30RGH105	1.05		ORSIH105	M-OH	1.05						30PH139	1.05	1.88
0.35	1.10	1.85	30ZH110	1.10	30RGH110	1.10	VM111-30P	ORSIH111	M-1H	1.11						30PH145	1.10	1.88
	1.20	1.85	30ZH120	1.20			VM117-30P	ORSIH117	M-2H	1.17								
	1.30	1.85																
			30ZH120	1.20	30RGH120	1.20			M-3	1.23						30PH158	1.20	1.80
	1.30	1.78	30ZH130	1.30	30RGH130	1.30			M-4	1.32						30PH172	1.30	1.80
0.35	1.40	1.78	30ZH140	1.40			VM140-30S	ORSI091	M-5	1.39						30PH185	1.40	1.80
	1.50	1.75					VM167-30N	ORSI097		1.50								
			35ZH115	1.15	35RGH115	1.15			M-1H	1.16						35PH152	1.15	1.88
	1.25	1.85	35ZH125	1.25	35RGH125	1.25			M-2H	1.22						35PH165	1.25	1.88
	1.35	1.85	35ZH135	1.35	35RGH135	1.35			M-3H	1.28						35PH178	1.35	1.88
0.35	1.35	1.78	35ZH135	1.35	35RGH135	1.35										35PH178	1.35	1.80
	1.45	1.78	35ZH145	1.45	35RGH145	1.45			M-5	1.45						35PH191	1.45	1.80
	1.55	1.78	35ZH155	1.55	35RGH155	1.55	VM155-35S	ORSI100	M-6	1.57						35PH204	1.55	1.80
	1.65	1.76					VM165-35N	ORSI111		1.65								

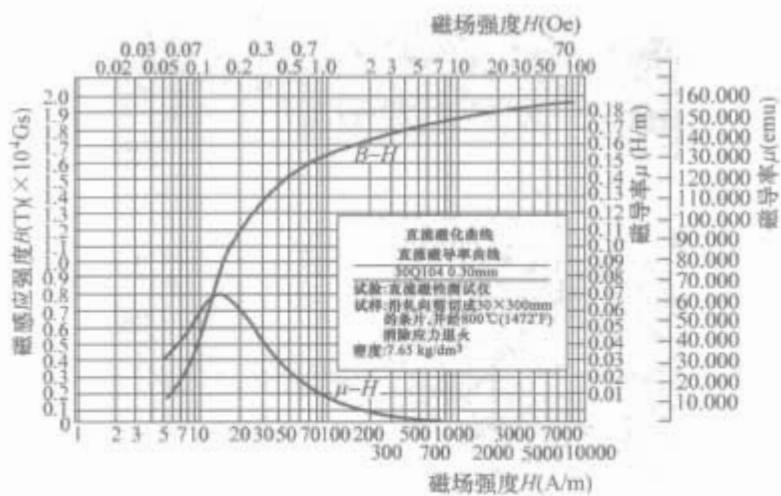


图 2.3-19 30Q130 硅钢片的直流磁化曲线

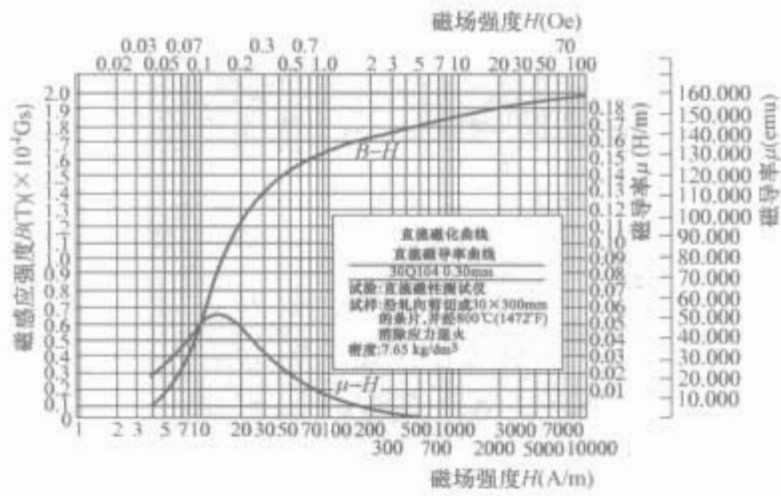


图 2.3-20 30Q140 硅钢片的直流磁化曲线

铁心结构分心式和壳式2种。心式变压器的铁心如图2.3-21所示。为了清楚起见，图中同时画出了绕组。这种铁心结构的特点是铁轭靠着绕组的顶面和底面，但不包围绕组的侧面。由于心式铁心结构比较简单，绕组的布置和绝缘也比较容易，因此，大部分变压器主要采用心式铁心结构。

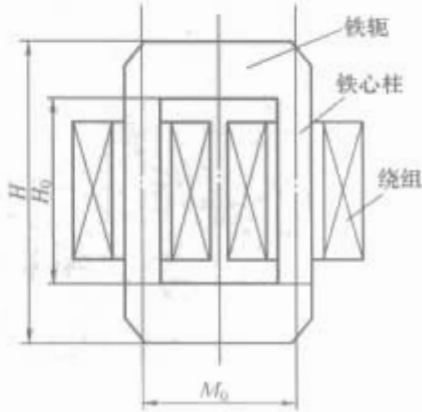


图 2.3-21 心式变压器铁心

在实际生产中，铁心柱的级数随变压器容量的增加而增多。小容量变压器的铁心柱也有做成正方形的。在大容量变压器中，为了改善铁心的冷却条件，常在铁心中开设油道，以利散热。为了节约绕组材料，变压器铁心柱的形状一般为多级圆形截面，而且对每级的宽度均经过优化计算，使铁心的有效截面积最大，填充系数最高。在选定铁心截面时要遵循4个原则：

- (1) 心柱的填充系数要高，也就是说，心柱的几何面积与其外接圆的面积之比要大。
- (2) 铁心加工和装配容易。
- (3) 考虑在心柱夹紧时，防止局部变形而超差。
- (4) 满足变压器的电气参数要求，如匹配阻抗负载、损耗及成本等因素综合考虑选择最优结构。

变压器铁轭的截面有矩形的，也有阶梯形的，如图2.3-22所示。为了减小变压器的空载电流和铁耗，在心式铁心中，铁轭截面一般比铁心柱截面大5%~10%。在大容量变压器中也有做成相等的。为了减小质量及尺寸，铁轭通常设计几个大级，总级数少于铁心柱的级数，靠近绕组部分采用平面结构，远离绕组部分为近似凸形结构。

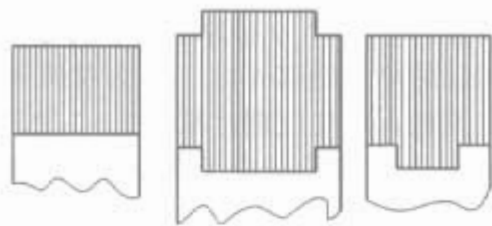


图 2.3-22 铁轭截面的各种形状

1.4.1.2 叠片式铁心的装配

叠片式铁心的装配方法一般采用交错式装配，它是将剪成一定尺寸的硅钢片交错叠装而成。叠装时，相邻层的接缝要错开，如图2.3-23所示。为了减少装配工时，通常用2~3张硅钢片作一层，采用自动叠片时可以采用单片叠装。这种叠法的优点是接缝处气隙小，夹紧结构简单，缺点是装配工艺较复杂。如按图

图 2.3-23 叠片式铁心的叠装次序

2.3-23所示下料和叠装，则在磁路转角处，由于磁密方向和轧碾方向成90°，将引起铁耗增加。因此，为了使磁通方向和轧碾方向基本一致，一般采用斜接缝或半斜接缝硅钢片的叠装法。

1.4.1.3 铁心的有关参数计算

(1) 铁心质量计算（见图2.3-21）。

铁心总质量
铁心柱质量
铁轭质量

$$\left. \begin{aligned} G_c &= G_z + G_e + G_0 \\ G_z &= H_0 A_z \gamma \times 10^{-3} \\ G_e &= M_0 A_e \gamma \times 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (2.3-8)$$

式中： H_0 为铁心窗高，cm； M_0 为铁心中心距，cm； A_z 为铁心柱有效截面积，cm²； A_e 为铁心铁轭有效截面积，cm²； γ 为铁心密度，kg/dm³； G_0 为角重，对于铁心直径按照标准尺寸（0、5取整）设计的铁心可查阅《电力变压器手册》，对于铁心直径不是标准尺寸的铁心则要求另外计算，如果铁心四周倒角，则要将倒角部分质量去除，对每一级铁心片，4个倒角可按2个矩形体计算，然后累加。

(2) 变压器铁心损耗计算。当铁心柱磁通密度与铁轭的磁通密度分别为 B_z 与 B_e 时，变压器的空载损耗为

$$P_0 = K_{P0} (p_z G_z + p_e G_e) W \quad (2.3-9)$$

式中： p_z 和 p_e 分别为相应于 B_z 和 B_e 的电工钢片的单位损耗； K_{P0} 为材质和制造工艺的空载损耗附加系数，冷轧硅钢片取1.1~1.2，铁心直径小时取大值。

(3) 空载电流。

1) 有功分量

$$I_{0a} = \frac{P_0}{2U_{1N}} \quad (A) \quad (2.3-10)$$

2) 有功分量百分数

$$i_{0a} = \frac{I_{0a}}{I_{1N}} \times 100\% = \frac{P_0}{10S_N} \% \quad (2.3-11)$$

3) 无功电流分量

$$I_{0r} = \frac{Q_0}{2U_{1N}} \quad (A) \quad (2.3-12)$$

$$i_{0r} = \frac{I_{0r}}{I_{1N}} \times 100\% = \frac{Q_0}{10S_N} \% \quad (2.3-13)$$

4) 励磁容量

$$Q_0 = k_{q_0} \left(q_z G_z + q_e G_e + \frac{q_{1z} A_z n_z}{\sqrt{2}} + \frac{q_{1e} A_e n_e}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.3-14)$$

式中： q_z 和 q_e 分别为相应于铁心 B_z 和铁轭 B_e 的电工钢片

的单位励磁容量； q_{je} 和 q_{je} 分别为相应于铁心 B_x 和铁轭 B_e 的电工钢片接缝的单位励磁容量； k_{q_0} 为材质和制造工艺的励磁电流附加系数，冷轧硅钢片取1.1~1.2，铁心直径小时取大值； n_x 和 n_e 分别为相应于铁心和铁轭接缝数量，单相为2。

5) 空载电流

$$I_0 = \sqrt{I_{0n}^2 + I_{0r}^2} \tag{2.3-15}$$

6) 空载电流百分数

$$i_0 = \sqrt{i_{0n}^2 + i_{0r}^2} \tag{2.3-16}$$

图 2.3-24 所示为单相壳式变压器的铁心，其特点是铁轭不仅包围绕组的顶面和底面，而且还包围绕组的侧面。变压器油箱设计成适形结构，紧包变压器铁心及绕组，所以，该变压器内部结构紧凑，可以减小变压器尺寸及质量。国产 SS₇ 系列变压器及 200km/h 动车组变压器均采用壳式铁心结构。

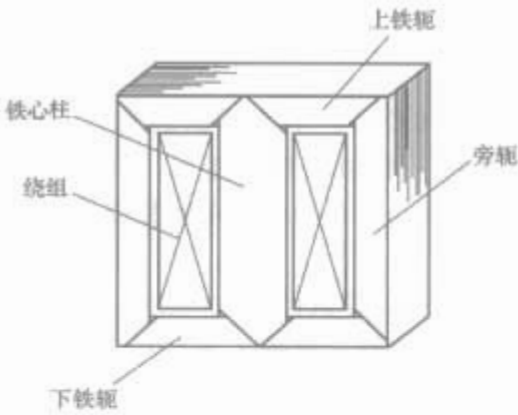


图 2.3-24 单相壳式变压器铁心

200km/h 动车组 ATM9 型变压器采用壳式铁心结构，使用 30ZH105E 特制硅钢片，性能参数按照日本新日铁公司特制 Z-E 取向硅钢带确定。

1.4.2 绕组

1.4.2.1 变压器绕组结构形式

变压器绕组主要由线圈绕制而成，根据线圈的绕制特点，可分为圆筒式、饼式、连续式和螺旋式等几种主要形式。

(1) 圆筒式线圈。圆筒式线圈是最简单的一种线圈形式，由一根或几根并联的绝缘导线沿铁心柱高度方向连续绕制而成，如图 2.3-25 所示。

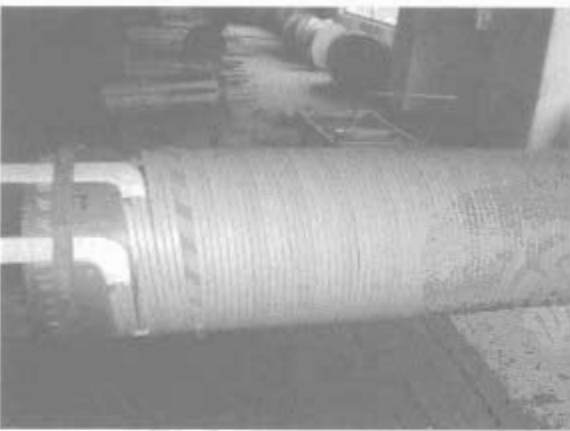


图 2.3-25 圆筒式线圈

用作低压绕组时，因电压较低，电流较大，导线截面大，匝数少，通常采用扁线绕成单层或双层圆筒式线圈。在双层圆筒线圈中，有时在层间也设轴向油道。当层数较多时，为了便于线圈内部散热，层间设轴向油道，如图 2.3-26 所示。

(2) 饼式线圈。饼式线圈是同一根或几根并联的绝缘扁线沿铁心柱的径向一匝接着一匝地串联绕制而成，数匝成一饼。为了便于散热，饼间设有径向油道。通常以两饼作为一

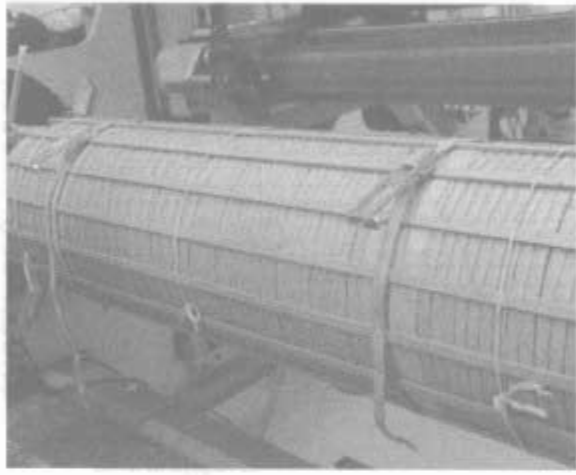


图 2.3-26 多层圆筒式线圈

个单元一次绕成，中间无接头，叫双饼式。一般用于心式变压器外线圈或者壳式变压器中，如图 2.3-27 所示。



(a)



(b)

图 2.3-27 饼式线圈

- (a) 交错饼式线圈（壳式线圈）；
- (b) 交错饼式线圈（心式线圈）

(3) 连续式线圈。连续式线圈是由很多线饼沿轴向串联绕成。但绕制时，先是若干匝沿径向串联组成一个线饼，然后采用特殊的“翻绕法”，使绕制连续地过渡到下一个线饼，线饼之间没有焊接头，如图 2.3-28 所示。连续式线圈一般用于匝数较多的高压绕组和其他特殊要求的绕组。



图 2.3-28 连续式线圈

(4) 螺旋式线圈。螺旋式线圈是由多根扁线沿径向并联排列，然后沿铁心柱轴向高度像螺纹一样，一匝跟着一匝地

绕制而成。这时一个线饼就是一匝，当并联导线数太多时，可把并联导线沿轴向分成几排，绕成多螺旋式线圈。为了减小导线中的附加损耗，绕制过程中将导线进行换位，如图 2.3-29 所示。这种线圈一般用于电流在 2000A 左右的低压绕组。

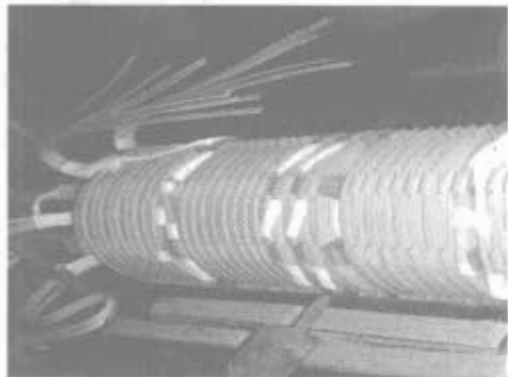


图 2.3-29 螺旋式线圈

由于线圈的实际漏磁比较复杂，尤其是端部漏磁和轴向安匝不均匀引起的横向漏磁对换位的影响很复杂。因此，单螺旋、双螺旋的换位方法，实际上都是不完全的。特别是巨型变压器的低压绕组附加损耗（涡流损耗和不完全换位损耗）可达基本电阻损耗的 30% 甚至更高，十分可观。故近年来普遍采用换位导线绕制低压绕组。

换位导线是在绕制线圈前预先完成换位的多根并联导线，2 个换位间的节距通常为 80~250mm。用换位导线绕制的线圈，它的并联导线间的换位，像双螺旋均匀交叉换位过程一样，这个过程重复了数十次乃至数百次以上，因此，线圈的换位是完全的。由于换位导线的每根导线的截面较小，厚度较薄，换位又完全，因此，其附加损耗特别小，适用于制造大型变压器中、低压绕组。对于交流传动变压器，考虑到高频损耗等因素，低压绕组主要采用换位导线，如图 2.3-30 所示。

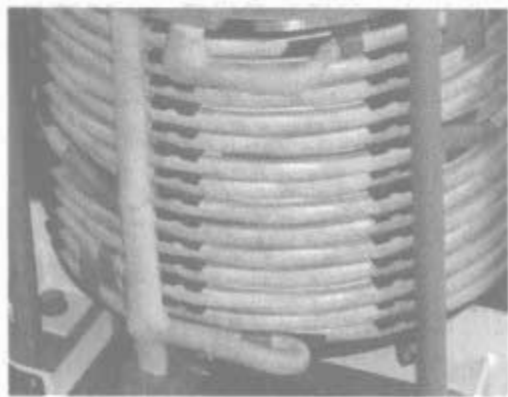


图 2.3-30 换位导线线圈

为保证变压器绕组有足够的电气强度，除采用合适的绕组绝缘结构，设计的数据充分可靠外，制造线圈的工艺过程、使用的材质优劣以及工艺环境等对绕组绝缘的电气强度也有决定性的影响。因此，在绕组的整个制造和装配过程中，必须注意以下几点：

- 1) 导线规格及其绝缘符合设计要求，导线本身应无毛刺、尖角、裂纹，绝缘无破损、起层；焊接质量可靠。
- 2) 绕组的所有绝缘（包括匝绝缘、层绝缘、油道绝缘和主绝缘等）应符合要求，在整个制造过程中要保持清洁，不得有导电粉尘夹杂。存放处应干燥防尘。
- 3) 线圈制造中换位、衬垫和绑扎等要合适，确保线圈压紧和运行中不致损坏匝绝缘。
- 4) 不同电压等级的绕组绝缘的干燥和浸油处理（指器身处理）符合规定。真空浸油、真空注油比一般浸油匝绝缘强度可提高 30% 以上，油道强度可提高 10% 以上，主绝缘

强度可提高 20%~30%。因此，规定真空浸油的产品不可按常压浸油处理。

5) 不浸漆变压器绕组的规定。通常，当绕组的固体绝缘较厚时，绝缘不易浸透，易在绝缘中夹杂残留气泡致使绝缘击穿。考虑到浸漆会使纸质匝绝缘的电气强度降低 20% 以上，此时特殊变压器绕组可采用不浸漆处理工艺。

1.4.2.2 电磁线

变压器大量采用纸包电磁线。规定：纸包圆铜线，型号为 Z；纸包圆铝线，型号为 ZL；纸包扁铜线，型号为 ZB；纸包扁铝线，型号为 ZLB；采用 Nomex 材料包扎时，标号为 NZB（扁铜线）。

对于纸包电磁线，要求绝缘层应紧实、均匀，不应有皱褶、开裂及超差等现象。绝缘纸层应连续绕包，不可缺少纸层。纸带绕包节距应不大于 30mm，并要求铝、铜导线表面应清洁，无擦伤、毛刺，油污及金属夹渣或锈蚀缺陷；相邻两层纸带绕包间隙不应重合，错开位置应不小于 3mm，纸带的厚度应不大于 0.12mm，最好用 0.05~0.08mm 绝缘纸带绕包。同一绝缘厚度，用薄纸带分多层搭边绕包，比用厚纸带绕包好，能使绝缘层包扎得紧实平整，每层搭边宽度可为纸带宽度的 1/3~1/2。各种匝绝缘厚度所用纸带的层数及允许偏差见表 2.3-4。

表 2.3-4 匝绝缘纸带的层数及允许偏差

匝绝缘厚度 (mm)	0.45	0.6	0.95	1.35	1.6	1.95	2.45	2.95
0.05 电缆纸 (层)	1	1						
0.08 电缆纸 (层)	2	3	4	8	8	10	12	16
0.12 电缆纸 (层)			1		1	1	2	1
绝缘层公差	±0.05	±0.06	±0.1	±0.15	±0.15	±0.15	±0.2	±0.25

1.4.2.3 耐热强度

绕组的耐热强度包含两方面：其一，在长期工作电流产生的热作用下，绕组绝缘的使用寿命应不少于 20 年；其二，变压器在运行条件下，在任意线端发生突然短路，绕组应能承受住此短路电流所产生的热作用而无损伤。

(1) 绕组绝缘的使用寿命。变压器所用的绝缘有许多因素同时作用，如温度、湿度、机械振动、机械冲击力、周围大气或介质以及由于温度变化所导致的热膨胀应力等。在这些因素的作用下，绝缘材料的各种性能逐渐变化（俗称老化），最后不能保证安全运行。变压器用绝缘材料的耐热分级，是以正常运行条件下所作用的各项因素为基础，主要按能够长期使用的极限温度来区分。所谓长期使用，是指在某一温度下能获得的经济使用寿命。对于电力变压器，经济使用寿命确定为 20 年；对于机车变压器，寿命要根据实际运行工作状况确定；如果变压器平均使用时间为 50%，则平均寿命要延长将近一倍，一般确定为 30 年。也可以按照机车运行里程衡量变压器寿命。老化了的绝缘，其电气强度只略有降低，其力学性能却明显降低，所以，绝缘是否老化，主要是以其力学性能的变化来判断的。从外观判断，老化了的绝缘颜色会变深，出现自然龟裂、脆化、脱落等现象。

绝缘材料的耐热分级和长期使用的极限温度列于表 2.3-5。极限温度系指最热点温度。

表 2.3-5 绝缘材料的耐热分级

耐热分级	A	E	B	F	H
极限温度 (℃)	120	135	170	195	220

根据长期使用的经验，由于变压器的电压较高，电场作用较强等因素，要保证变压器的使用寿命不低于 30 年，其所用绝缘材料的长期使用的极限温度，实际比表 2.3-5 所列数值略低。例如，油浸式变压器的绝缘（A 级）长期使用的极限温度根据运行经验应为 98℃。

显然，绝缘材料长期运行的温度低，绝缘老化慢，使用寿命长；反之，长期运行的温度高，绝缘老化快，使用寿命短。

普通 A 级绝缘电力变压器的使用寿命 L 和长期运行温度的关系，根据运行经验，可用式 (2.3-17) 表示，即

$$L = 20 \times 2^{\frac{98-t}{6}} \times 2^{-\frac{t}{10}} \quad (2.3-17)$$

式中： t 为绝缘运行温度，℃，不超过 140℃。

由式 (2.3-17) 可以看出：当 $t=98℃$ 时，使用寿命 $L=20$ 年（正好是经济使用寿命）；当 $t=104℃$ ， $L=10$ 年；当 $t=92℃$ ， $L=40$ 年。即温度每升高（或降低）6℃，绝缘老化寿命降低一半，这种现象称为“6℃定则”。

变压器运行时，电流流过绕组要产生损耗，通常首先是导线的电阻损耗，其次是导线的涡流损耗和并联导线换位不完全在导线间有循环电流引起的换位损耗等。这些损耗全部以热的形式表现出来，使导线的温度升高至一定的数值。变压器绕组绝缘的工作温度就是导线的温度，显然，为保证变压器的使用寿命，必须对绕组的工作温度加以限制。TB/T 1680—2006《铁路应用 机车车辆牵引变压器和电抗器》中规定：变压器在额定容量和额定使用条件下长期工作时，绕组的温升（对环境温度）应不超过表 2.3-6 的规定。

表 2.3-6 绕组的温升限值（平均温升，电阻法）

设备的部位	绕组的耐热等级	温 升		极限温度 (℃)
		1 类工况	2 类工况	
绕组 (平均)	A	75	75	120
	E	95	95	135
	B	130	105	170
	F	155	130	195
	H	180	160	220
	200	200	180	240
	220	220	200	260
O 类液体 K 类液体	250	250	230	290
		65	65	105
		150	150	190

- 注 1. 对于导向油流冷却方式，绕组温升限值可以增加 5K；对于 O 类液体，只有 A 类耐热等级的极限温升是允许的；对于 K 类液体，绕组和液体的极限温升如表所示。
2. 当使用某些绝缘材料（防潮纸、耐热纸和特殊的绝缘材料）时，经过制造商与用户协商，可采用较高的限值。
3. 对充气单元而言，考虑所用气体的特性，气体和绕组的温升限值由制造商和用户规定；对绕组而言，极限值不应超过表中所规定的极限温度。

为了保证绕组的使用寿命，在变压器设计和制造时，除了有足够的变压器外部冷却条件外，绕组的内部也应有良好的冷却条件，即满足散热需要的纵向和横向油道（或气道）。制造上要保证绕组内部的冷却油道（或气道）畅通无阻。此外，绕组的额定温升要符合铁道标准的规定，所用绕组绝缘材料的耐热等级要合适。变压器绕组常用绝缘材料按耐热等

级列于表 2.3-7。

表 2.3-7 绕组常用绝缘材料（按耐热等级）

变压器类别	耐热等级	允许工作温度 (℃)	绕组常用绝缘材料
油浸式	A	105	经过浸渍处理或绝缘处理的纸、棉纱、天然丝、纸板等，用植物油改良的天然树脂漆、虫胶、漆布、漆丝等
	H	180	以合适的树脂（如硅有机树脂）黏合或浸渍，涂覆后的云母、玻璃纤维、A 板、聚酰胺、二苯醚等材料，以玻璃丝布和石棉纤维为基础的层压制品
干式	B	130	以合适的树脂黏合或浸渍，涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等，高强度漆包线的绝缘，以纤维素纸和布为基础的层压制品
	H	180	以合适的树脂（如硅有机树脂）黏合或浸渍，涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等材料，以玻璃丝布和石棉纤维为基础的层压制品

(2) 绕组的热稳定。变压器在运行中，由于事故、网络或变压器端子发生突然短路，在绕组中会流过超过正常工作电流数倍至数十倍的短路电流，短时间内绕组损耗加大，温度很快上升，即瞬变过热。

按国家标准规定，变压器绕组应能经受住由此短路电流所产生的瞬时高温作用，这个温度可达 250~380℃，这种瞬间温度是允许的，但作用时间不得超过国家标准规定。

1.4.2.4 绕组的绝缘结构

绕组的绝缘分为主绝缘和纵绝缘。主绝缘是指绕组对其本身以外的其他结构部分的绝缘，包括对油箱的绝缘，对铁心、夹件和压板的绝缘，对同一相内其他绕组的绝缘以及对不同相绕组的绝缘。习惯上常常把绕组端部至铁轭或者相邻绕组端部间的绝缘称为端绝缘，实际上它也是属于主绝缘的范畴。纵绝缘是指绕组本身内部的绝缘，它包括匝间绝缘、层间绝缘、线段间绝缘以及线段与静电板间的绝缘。

变压器绕组在变压器正常运行中，除承受长期工作电压外，还必须承受供电系统接触网过电压、内部过电压和大气过电压的作用。目前，采用国家标准规定的工频试验电压和冲击试验电压来考核。变压器绕组的主、纵绝缘就是由这几种电压确定的。

由于上述原因，目前确定绕组的冲击电位分布和梯度分布，通常以理论上定性分析和简化电容等值电路计算以及一些类似的产品或模型冲击分布为依据，初步确定主、纵绝缘结构，再由模型或实际产品的冲击测量结果得出此产品的实际电位和梯度分布。再次设计此类产品时，则以这些数据为依据确定绕组的主、纵绝缘。

1.4.2.5 绕组绝缘的电气强度

要确保变压器长期安全可靠地运行，首先必须保证变压器绕组的绝缘有足够的电气强度，即必须保证在各种过电压作用下，变压器绕组的主、纵绝缘有足够的电气强度。这里重点分析讨论绕组间主绝缘的电气强度、绕组端绝缘（指绕组至铁轭、连接片）的电气强度以及绕组纵绝缘的电气强度（包括匝间、层间、段间的电气强度）。

(1) 绕组之间主绝缘的电气强度。在设计油—隔板式主

绝缘结构的变压器时，绕组间的主绝缘距离基本上是由紧靠线圈表面油道中所出现的电场强度来决定的。在试验电压下，此电场强度不应超过许可值。这个许可值是由线圈表面处的油道宽度和线圈与纸筒间撑条的绝缘结构形式来决定的。

薄纸筒小油隙主绝缘计算原理。高、低（中）压绕组为同心布置，且为饼式线圈，线圈间为薄纸小油隙的油—隔板绝缘结构，即油、纸板交错放置。首先，根据前面所计算的电压分布结果和绝缘结构的布置，采用具有多介质的平行平板电场的等值油距办法，计算出本绝缘结构的油隙在平均计算电压下的场强。然后按表 2.3-8 给出的某一油隙在均匀电场下的击穿场强 E_{dmin} ，由 E_{dmin} 求出本绝缘结构允许击穿场强。只要油隙在平均计算电压下的场强乘上规定的安全系数后等于或略小于此允许击穿场强，就表明所选择的绝缘结构是合理的。

表 2.3-8 均匀电场下最小击穿场强 E_{dmin} mm													
匝绝缘厚度	油 隙												
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	141	123	113	101	94	88	84	79	75	72	69	67	65
0.45/2	147	127	117	107	100	94	89	84	80	76	73	71	69
0.95/2	159	140	127	117	109	102	96	90	87	83	79	77	74
1.35/2	162	143	131	120	112	105	99	94	89	85	81	79	76
≥1.95/2	168	150	137	127	118	111	105	99	94	89	85	81	79

（2）绕组纵绝缘电气强度。变压器纵绝缘结构设计，以往主要是依靠大量的探测模型、电磁模型、实体大模型及变压器产品进行大量的冲击测量，根据冲击测量结果进行裕度分析，在保证一定的冲击裕度下定出合理的匝间绝缘和油道绝缘。纵绝缘的数据一定要通过模型的冲击试验来取得。近年来，由于电子计算机用于变压器波过程计算，这就给纵绝缘结构的设计带来十分方便和有利的条件，它的运用不仅可以节省大量的人力和物力，而且在短时间内，能进行多种方案的比较，为选择最佳绝缘结构方案创造了条件。

层间、匝间及油道的绝缘强度是变压器纵绝缘结构设计的基础，然而要得到这方面的数据，需要进行大量的基础性试验研究，要找出在一定工艺条件下，在不同类型的电压作用下，层间、匝间及油道的允许场强和放电几率。

1) 匝绝缘耐压强度。匝绝缘厚度是指导线两边绝缘层的总厚度，如图 2.3-31 中的 δ 。用作匝绝缘的材料有漆、纱、丝和纸（电话纸和电缆纸），绝大部分变压器用电缆纸作匝绝缘。表 2.3-9 给出的是纸包线匝绝缘的最小击穿电压。

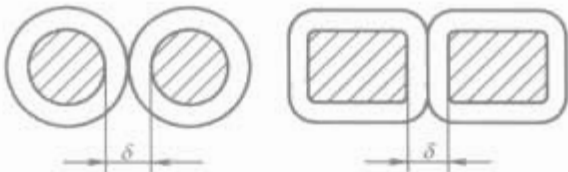


图 2.3-31 匝绝缘厚度

表 2.3-12 层间绝缘最小击穿电压									
层间绝缘厚度 (mm)		2×0.12	3×0.12	4×0.12	5×0.12	6×0.12	7×0.12	8×0.12	10×0.12
聚酯漆包线或纱包线	工频(kV)	9	11.5	14	16.5	18.5	20.4	22	24
	冲击全波(kV)	15.7	20.1	24.5	28.9	32.4	35.7	38.5	42
0.3匝绝缘纸包圆线	工频(kV)	12	15.5	19	22	24.8	27.2	29.4	32
	冲击全波(kV)	21	27.1	33.3	38.5	43.3	47.6	51.5	56

表 2.3-9 纸包线匝绝缘工频及冲击全波最小击穿电压

匝绝缘(mm)		0.45	0.95	1.35	1.95	2.95
工频最小击穿电压 (有效值)(kV)	工艺过程 A①	9	16	21	29	39
	工艺过程 B②	12	21	29	37	49
冲击最小击穿电压 (有效值)(kV)	工艺过程 A①	17	28	39	51	66
	工艺过程 B②	29	56	81	104	134

① 35kV 以下电力变压器处理过程。
② 66kV 以上电力变压器处理过程。

2) 层间绝缘强度。层间绝缘的结构形式如图 2.3-32 所示，用于圆筒式线圈。目前，层间绝缘是根据相邻两层间最大工作电压设计的。层间用油道绝缘时如图 2.3-32 (a) 所示，在满足电气强度要求的情况下，按散热要求考虑。一般情况下油道及层间绝缘选用表 2.3-10 和表 2.3-11 给出的数据，特殊情况要另行考虑。

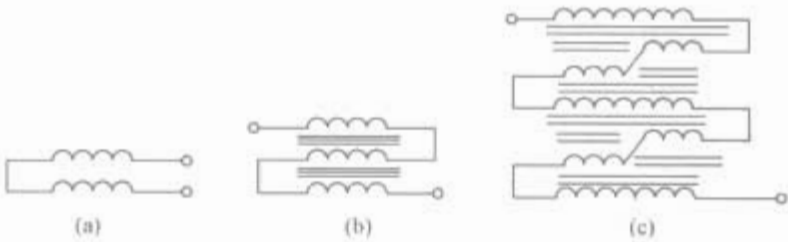


图 2.3-32 层间绝缘

(a) 层间用油道绝缘；(b) 整体层间绝缘；(c) 分级层间绝缘

表 2.3-10 圆筒式线圈层间油道宽度 mm

线圈高度 (包括端绝缘)	350 及以下	350 ~ 400	401 ~ 450	410 ~ 500	501 ~ 550	551 ~ 600	601 ~ 650	651 ~ 700	700 及以上
油道最小宽度	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8

表 2.3-11 圆筒式线圈层绝缘

层间最大工作电压(V)	850 及以下	851 ~ 1500	1501 ~ 2000	2001 ~ 2500	2501 ~ 3000	3001 ~ 3500	3501 ~ 4000	4001 ~ 4500	4501 ~ 5000
层间用 0.12 电缆纸张数	2	3	4	5	6	7	8	9	10
层间用 0.08 电缆纸张数	3	4	6	7	8	9	10	11	12

当层间绝缘纸超过 6 张时，可采用分级绝缘以缩小线圈的径向尺寸。最窄一级层绝缘宽度是最大一级宽度的 1/2，如图 2.3-32 (c) 所示。

另外，层间绝缘还应通过击穿电压加以校核。层间绝缘的耐压数值不但与层间绝缘厚度有关，而且与导线型号（聚酯漆包线、纸包圆线和纸包扁线）有关。表 2.3-12 所列的层间绝缘最小击穿电压是通过试验取得的。

层间最小冲击击穿电压是根据工频击穿电压再考虑冲击系数后推算得到的。

3) 油道（段间）绝缘强度。油道段间的绝缘强度与梯度波作用时间有关，表 2.3-13 给出的是全波 1/20μs 和截波 3μs 的数据。表 2.3-14 给出的是段间油道最小击穿电压。

表 2.3-13		冲击电压下油道最小击穿电压									kV
匝绝缘厚度 (mm)	油道宽 (mm)										
	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30	
0.6	156/110	188/132	208/154	230/170	250/187	268/194	286/210	302/226	335/252	376/289	
0.95	174/120	195/143	216/165	236/181	256/198	275/210	292/226	310/236	341/262	388/299	
1.35	181/130	200/148	220/170	242/187	261/202	280/213	297/229	312/241	346/265	391/302	
1.6	187/137	206/154	228/176	246/192	266/209	284/216	302/232	319/246	350/270	394/306	
1.95	194/143	211/160	231/181	250/198	270/214	297/220	306/236	328/250	355/276	398/310	

表 2.3-14 段间油道最小击穿电压							续表	
导线匝绝缘厚度(mm)	0.45				0.45 组合 1.35	1.35		
油道宽(mm)	5	6	2×0.5 纸卷	3×0.5 纸卷	6	6		
全波最小击穿电压(kV)	90	105	75	85	110	115		
截波最小击穿电压(kV)	110	130	95	105	135	145		

注 工艺过程为真空干燥、浸漆、烘干、浸油，相当于 35kV 及以下产品。

1.4.2.6 主绝缘结构

0.5~40kV 变压器各部分主绝缘结构如图 2.3-33 所示。

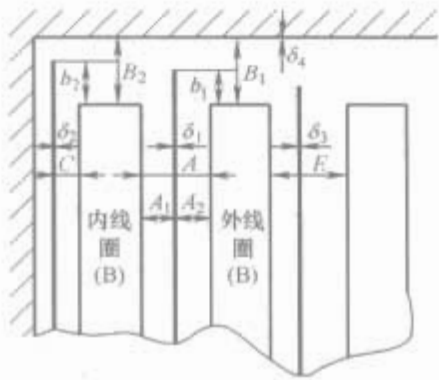


图 2.3-33 0.5~40kV 变压器各部分主绝缘结构

内线圈至铁心的主绝缘距离。当变压器器身处理为真空干燥、一般浸油时，0.5~40kV 级内线圈对铁心的主绝缘距离见表 2.3-15。表中纸筒厚度为最小尺寸（包括制造裕度），视结构需要可以加大。硬纸筒内径尺寸尾数应为 5 或 0。

表 2.3-15 0.5~40kV 级内线圈至铁心的主绝缘距离							
电压级次 (kV)	全波工频试验电压(kV)	线圈结构形式	主绝缘距离(mm)				
			C	δ ₂	B ₂	b ₂	δ ₄
0.5	5/—	①	1	1	由结构尺寸定		0
		②	9	3			0
3(6)	25/60	①	8	3	25	15	0
		②	9	3	25	15	0
10	35/80	①②	10	3	35	20	0
15	45/108	①②	14	3	45	30	0
20	55/130	①②	17	3	55	40	0
35	85/200	①②	27③	5	70	55	3

电压级次 (kV)	全波工频试验电压(kV)	线圈结构形式	主绝缘距离(mm)				
			C	δ ₂	B ₂	b ₂	δ ₄
40	95/230	①②	30③	5	80	65	3

①圆筒式；②饼式；③饼式线圈时，上下两端端部两段，内径垫纸条 5mm。

1.4.3 套管

变压器的引出线穿过油箱盖时，必须经过绝缘套管，以使带电的引线和接地的油箱绝缘。传统的绝缘套管一般是瓷套管。由于电力机车及动车组变压器空间尺寸及质量的要求，近年来出现了多种形式的套管结构，如图 2.3-34 和图 2.3-35 所示。套管的性能应满足 TB 1333—2005《规定的电气绝缘强度要求、机械强度性能要求、发热与冷却性能要求和安装与维护性能要求，见表 2.3-16。

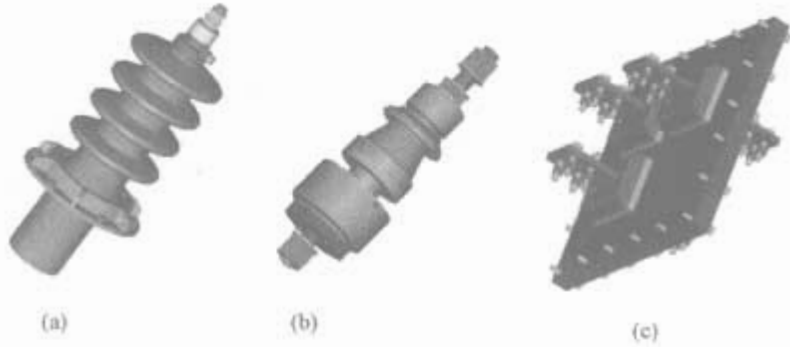


图 2.3-34 绝缘套管
(a) 25kV 高压套管；(b) 低压套管；(c) 低压出线端子

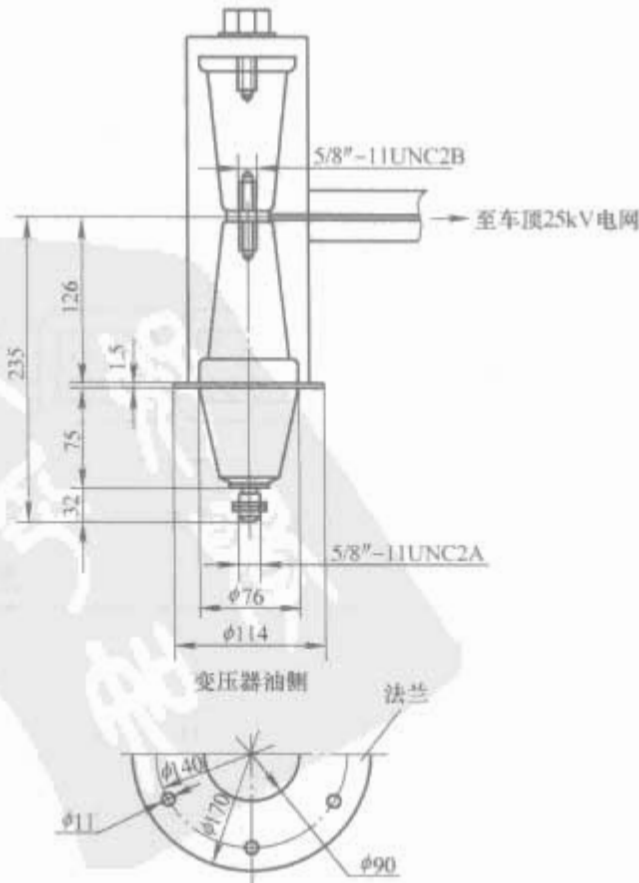


图 2.3-35 25kV 高压复合出线端子外形及安装尺寸

表 2.3-16 25kV 高压复合出线端子技术数据

参 数	数 据
最高工作电压(kV)	36
局部放电量(pC/kV)	5/36
额定雷电冲击耐受电压(1.2/50μs)(kV)	170
额定雷电冲击耐受电压(50Hz/1min)(kV)	70
额定工作电流(A)	630
额定瞬时短路电流(1s)(kA)	28
额定耐受峰值电流(kA)	70
温度稳定性(℃)	105
材料	树脂浇注
外形安装尺寸	见图 2.3-35

1.4.4 其他部件

1.4.4.1 储油柜

储油柜装在车体内，用带快速接头的软管或者直接与油箱相连。储油柜的功能：①减小变压器油与空气的接触面积，减缓变压器油的老化过程；②当油箱中变压器油受热膨胀时，多余的那部分变压器油进入储油柜中，并储存在储油柜里，当油箱中的变压器油变冷收缩时，原来油箱中的油不能充满油箱了，这时储油柜里的油就通过联管进入油箱，并把油箱填满，使油箱在任何时候都充满变压器油。因此，储油柜在高温（如 40℃）并在变压器持续运行时，不能溢出油；在低温（如 -30℃）且变压器不运行时，储油柜中应有油。

1.4.4.2 油表

油表装在储油柜上，油表旁边有 40℃、20℃、-30℃ 等刻度，这些刻度是指变压器未工作、在环境温度分别为 40℃、20℃ 和 -30℃ 时储油柜里的油应具有的油位，并可根据油位指示调整变压器油量。

1.4.4.3 吸湿器

吸湿器装在储油柜上，用金属管与储油柜上部空间连接起来。当储油柜油面上升时，柜内油位上部空间的部分空气必须排往大气。当储油柜内的油位下降时，柜内油位上部的空气不足，需要从大气中吸进空气，以免形成负压。这就要求在储油柜与大气中建立一个通道，这种通道必须能把进入储油柜空气的湿气除掉，这个任务由吸湿器来完成。

吸湿器主体为一玻璃管，内盛有浸氯化钴处理的硅胶作吸湿剂，吸湿剂在干燥状态下呈蓝色，吸湿后变为红色。如果看到大部分硅胶的颜色变红，需把硅胶取下进行烘干处理。经烘干后，硅胶又呈蓝色，可以继续使用。

1.4.4.4 Pt100 电阻温度计

Pt100 电阻温度计装在箱盖上，共 2 只，它用来测量变压器油箱中上层油温，并有电信号送到司机室，在司机室显示屏上可显示油温。

1.4.4.5 油流继电器

油流继电器装在出油联管中。当潜油泵正常运行时，油流继电器的动合触点闭合，可显示信号，表示油循环正常。另外，还可观察玻璃面板内的指针摆动位置，判断油循环是否正常。油流继电器外壳的材质为铝。

油流继电器的动作原理为：继电器动板置于油联管内，当联管中的油流达到一定值时，动板被冲动，使传动轴旋转，其上的磁钢（永久磁铁）带动隔着薄壁的另一磁钢（永久磁铁）转动，于是动断触点打开，动合触点闭合，发出正常工作的信号；同时，指针直观地偏转 55°，显示油流正常。如果油流减少到一定程度，动板借弹簧作用力返回，带动指

针回零，同时动断触点闭合，动合触点打开，表示油流异常。

YJ-100-A 型油流继电器动作性能：

标称口径 (mm)	100
额定油流量 (m³/h)	80
动作油流量 (m³/h)	50
返回油流量 (m³/h)	30

1.4.4.6 压力释放阀

压力释放阀装在油箱壁上。变压器在运行中，因外电路或变压器内部有故障而出现很大的短路电流时，过高的热量会使变压器油迅速气化，从而使变压器内部压力升高。以 YSF5-70-25J 型压力释放阀为例，在压力升高到 70kPa 以上时，压力释放阀阀口在 2ms 内迅速打开，排出的气体和油流沿管路排到车下。当压力恢复到 30kPa 时，阀口关闭。

1.4.4.7 50 活门

50 活门在补油、注油、放油和滤油时使用。变压器的大量注油必须从此处注入。在投入工作时应将其密封板和遮盖卸下，工作完后，则应及时装上，以确保阀体内及变压器油不受污染，其结构简图见图 2.3-36，通过旋转手轮来关闭和打开活门。

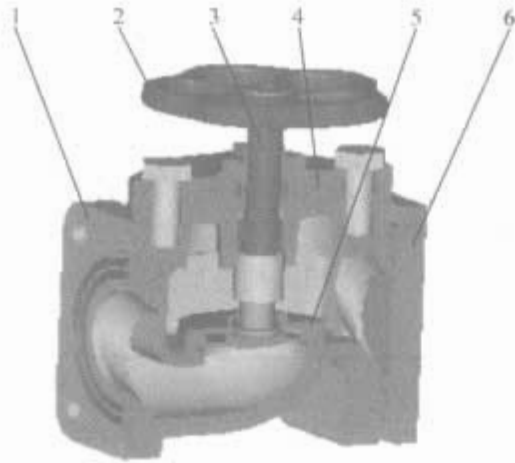


图 2.3-36 50 活门

1—阀体；2—手轮；3—阀杆；4—盖；5—阀座；6—压板

1.5 冷却系统

为了保证变压器的散热良好，必须采用一定的冷却方式将变压器中产生的热量带走。油浸式变压器分为油浸自冷、油浸风冷式、强迫油循环风冷、强迫油循环水冷等几种。应根据采用的冷却方式识别变压器。每种冷却方式使用的有关字母符号见表 2.3-17。

表 2.3-17 冷却方式使用的字母符号

冷却介质的种类	符号
矿物油或燃点小于或等于 300℃ 的合成绝缘液体	O
燃点大于 300℃ 的合成绝缘液体	K
燃点高于沸点的合成绝缘液体	L
气体	G
水	W
空气	A
自然循环	N
强迫（非导向油）循环	F
强迫导向油循环	D

在强迫导向油循环的变压器中，一定比例的强制油流经过导向以便流过绕组。但是，有些绕组可以有非导向油流，如独立的分接绕组、辅助绕组和稳定绕组。

1.5.1 符号的排列

变压器的每一种冷却方式用4个字母标出，冷却方式的定额由制造商规定。应使用表 2.3-18 所规定的符号顺序，采用斜线来分开表示不同冷却方式的一组符号。

例如，强迫导向油循环和强迫风循环油浸式变压器可用 ODAF 标识。

表 2.3-18 符 号 顺 序			
第 1 个字母	第 2 个字母	第 3 个字母	第 4 个字母
指出与绕组相接触的冷却介质		指出与外部冷却系统相接触的冷却介质	
冷却介质种类	循环种类	冷却介质种类	循环种类

对于可能选用非导向油流自然冷却或强迫冷却油浸式变压器，典型的标志是 ONAN/ONAF、ONAN/OFAF。

对于带非通风防护外壳的干式变压器，外壳内部和外部均为自然风冷，标志为 ANAN。

1.5.2 系统结构

冷却系统结构见图 2.3-37。

1.5.2.1 油路

热油由油箱上部（平波电抗器上方）被抽出，油流经潜液泵加压后，进入冷却柜。热油在冷却柜内与冷空气进行热交换后油温下降，从冷却柜出来的冷油沿油道进入变压器下部，先冷却变压器的铁心、绕组，然后冷却滤波电抗器、平波电抗器，最后油流回到油箱的出油口，如此循环。

1.5.2.2 风路

冷风从车体内吸入冷却柜。在冷却柜内的铝冷却器中，冷风和热变压器油进行热交换，热油被冷却，然后再进入油箱冷却绕组和铁心；而冷却风则被加热，最后排向大气。

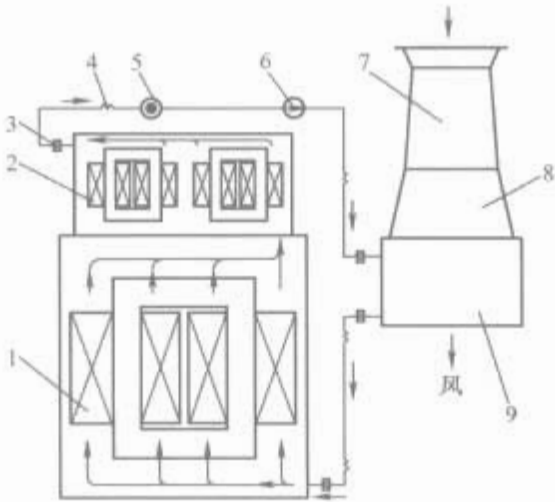


图 2.3-37 冷却系统示意
1—变压器器身；2—平波、滤波电抗器器身；
3—蝶阀；4—波纹管；5—油流继电器；
6—潜油泵；7—通风机；
8—过渡风道；9—冷却柜

对于卧式变压器，大多数冷却器与变压器分开布置，但是总的冷却原理是相似的。

对于变压器，发热计算可以采用传统的计算方法加以计算，但是变压器冷却则是一个全新的课题，尤其是近年来冷却器技术的不断发展，大量铝合金板翅式冷却器得到成功使用，为变压器的轻量化及尺寸小型化创造了良好的条件，新设计的冷却器取代了传统的铜管列管式散热器，给变压器冷却技术带来了重大的突破。

1.5.3 各型机车变压器油冷却器的性能指标（见表 2.3-19）

表 2.3-19 油冷却器的性能指标							
机车型号	额定试验工况				散热量 $Q(\text{kW})$	空气压力损失 $\Delta p_a(\text{Pa})$	油压力损失 $\Delta p_o(\text{Pa})$
	空气流量 $V_a(\text{m}^3/\text{h})$	油流量 $V_w(\text{m}^3/\text{h})$	进气温度 $T_{a1}(\text{℃})$	进油温度 $t_{w1}(\text{℃})$			
SS ₄ 改、SS ₆ B	20000	80	40	85	≥ 220	≤ 1175	≤ 80
1~158 号 SS ₄ 改	18000	80	40	85	≥ 185	≤ 1300	≤ 80
SS ₇ 、SS ₇ C	22500	80	40	85	≥ 250	≤ 1275	≤ 88
SS ₇ D、SS ₇ E	22500	80	40	85	≥ 260	≤ 1275	≤ 60
SS ₇ EB	27000	80	40	85	≥ 300	≤ 1100	≤ 50
SS ₈	20000	80	40	85	≥ 220	≤ 785	≤ 78.5
SS ₉ G	28000	95	40	85	≥ 300	≤ 1350	≤ 40
200km/h 动车组 ATM9	7500	42	40	105	≥ 150	≤ 400	≤ 26

1.5.4 冷却介质

1.5.4.1 变压器油

变压器油是变压器的重要绝缘材料，也是变压器的关键冷却介质。变压器应用较多为 25 号变压器油和 45 号变压器油。25 号变压器油用于最低气温在零下 25℃ 以上的环境，45 号变压器油用于最低气温在零下 45℃ 以上的环境，二者之间的差异主要体现在凝固点不同，其余主要参数一致。近年来，大量新品种的变压器油也得到广泛的使用，如 α 油、 β 油、硅油等。25 号变压器油常规试验指标见表 2.3-20。

表 2.3-20 25 号变压器油标准			
试验项目	标 准	注入油箱前 试验结果	运行中
在 20~40℃ 时密度(g/cm^3)	≤ 0.895	—	—
黏度 (20℃)	运动黏度(m^2/s)	$\leq 30 \times 10^{-6}$	—
	恩氏黏度(°E)	≤ 4.2	—

续表				
试验项目		标 准	注入油箱前 试验结果	运行中
黏度 (50℃)	运动黏度(m^2/s)	$\leq 9.6 \times 10^{-6}$	—	—
	恩氏黏度(°E)	≤ 1.8	—	—
闪点(闭口)(℃)		≤ 135	135	比新油降低 不超过 5℃
凝固点(℃)		≤ -25	—	—
机械混合物		无	无	无
游离碳		无	无	无
灰分(%)		≤ 0.005	无	0.01
活性硫		无	无	无
酸价(KOHmg/g)		≤ 0.03	0.023	0.4
钠试验等级		2	1	—
安定性				

续表			
试验项目	标 准	注入油箱前 试验结果	运行中
氧化后的酸价(mgKOH/ g)	0.2	0.04	—
氧化后沉淀物含量(%)	0.05	无	—
电气绝缘强度(标准油杯) (kV)		≥40	≥30
溶解于水的酸或碱	无	无	无
水分	无	无	无
在 20℃±5℃时的透明度	透明	透明	透明
70℃时介质损失角正切(%)	≤0.5		

25 号变压器油的主要物理性能和使用中注意事项如下：

(1) 颜色和透明度。新油颜色淡黄、透明，从一定角度看，油面有蓝色荧光。油逐渐老化后，油色逐渐变深，透明度下降，油面蓝色荧光消失。若油中含水分较多时，则变混浊、发白。45 号变压器油的颜色为无色，其余一致。

(2) 气味。新油有轻微的煤油气味。油老化后，呈酸味。烧损后的变压器，其油有焦臭味。

(3) 黏度（恩氏黏度°E）。黏度是指在一定温度下，从恩氏黏度计中流出 200mL 油所需时间与 20℃时流出同体积水所需时间之比。要求 20℃时，不大于 4.2。

(4) 凝固点。25 号变压器油，当温度低到－25℃时，全部失去了流动性，－25℃就是变压器油的凝固点。

(5) 闪点。新油规定不低于 135℃。变压器在运行中应定期检查变压器油的闪点，每半年至少检查一次。如果闪点比上一次下降 5℃以上，就应检查、分析是否有下列问题：

1) 油老化情况。

2) 变压器中是否混入轻质油，如汽油、煤油等，如果混入，闪点就会急剧下降。

3) 检查变压器本身是否有故障，如局部放电、局部高温等，引起绝缘材料析出氢、氧、一氧化碳、甲烷、乙烯、乙炔等气体，使闪点降低。

(6) 酸价及 pH 值。酸价也要定期检查。酸价就是中和 1g 油所需要的氢氧化钾的毫克数。运行中的变压器油的酸价不应高于 0.4mg（氢氧化钾）。酸价过高，说明油老化程度高，油耐压就会降低，这时应作再生处理，并注意检查变压器内部有无不良现象。

pH 值是用来表示油中水溶性酸的含量。pH 值为 7 时，呈中性（新油），pH 值小于 7 时，呈酸性（油老化所致），参见表 2.3-21。

表 2.3-21 不同酸、碱程度的 pH 值					
溶液反应	强酸性	弱酸性	中性	弱碱性	强碱性
pH 值	1~3	4~6	7	8~10	11~14

注 变压器在运行中，pH 值不应低于 4.4。

(7) 机械杂质、游离碳、水分。新油可通过滤油将它们除掉。运行中如发现有机机械杂质、游离碳、水分，则认为变压器可能有故障，需处理。

(8) 油老化问题。油老化后，颜色变深，黏度、酸价、皂化值都变大，钠试验不合格，耐压值降低，并产生油泥附着在器身和油箱上，严重影响变压器的运行。

为了延长变压器油的寿命，一方面要提高变压器品质；另一方面机车运行时不能过早关风机，特别是潜油泵，只要机车在运行，就应该正常运转，即使是风机关了，潜油泵也不能马上跟随着停机。此外，油中添加抗氧化剂（添加剂）

对延长变压器油使用寿命很重要，运行中的变压器油内抗氧化剂的含量不应低于 0.15%。现场如发现不是这个数字，应酌情添加。注意：使用的添加剂必须与油中原有的一致。国内常用的添加剂为 2,6-二叔丁基对甲酚，是一种黄白色或白色结晶，熔点为 69℃，沸点为 260℃，油溶解性好。

1.5.4.2 Alpha-1 绝缘油

变压器用 Alpha-1 绝缘油的技术参数见表 2.3-22。

表 2.3-22 Alpha-1 绝缘油的技术参数

特性与 ASTM 方法			Alpha-1 油
燃点,D92(℃)			≥270
闪点,D92(℃)			≥240
黏度,D88/CS _t	在 100℃时		≤8.5
	在 40℃时		≤52
在 20℃密度时(g/cm ³)			<0.86
凝点,D97(℃)			≤-45
外观,D1524			清
颜色,D1500,ASTM units			≤1.0
腐蚀性硫,D1275			非腐蚀性
含水量,ASTM D1533(×10 ⁻⁶)			<35
ASTM D2440 氧化试验	72h	渣质量(%)	<0.03
		酸值(mgKOH/g)	<0.03
	164h	渣质量(%)	0.01
		酸值(mgKOH/g)	0.01
Doble 工程 PFVO 试验无渣期(h)			>88
循环爆破试验,ASTM D2112(min)			384
界面张力,ASTM D971(mN/m)			50
介质击穿强度,D1816(kV)(间距 2mm 交货时)			≥50
损耗系数,100℃,D924(%)			≤0.3
相关容许性			2.1
酸值,D664(mgKOH/g)			≤0.01
生物降解(每个 BOD 试验)			是

1.6 试运行前检查项目

变压器试运行前应进行下列检查：

- 1) 变压器本体、冷却装置及所有附件均完整无缺、不渗油、油漆完整。
- 2) 接地可靠（变压器油箱、铁心和夹件接地）。
- 3) 变压器顶盖上无遗留杂物。
- 4) 储油柜、冷却装置、净油器等油路系统上的阀门均在“开”位置，储油柜油温标示线清晰可见。
- 5) 变压器的储油柜和充油套管的油位正常。
- 6) 进行各升高座的放气，使其完全充满变压器油，各主要部件内应无残余气体。
- 7) 吸湿器内的吸附剂数量充足，无变色受潮现象，油封良好，能起到正常呼吸的作用。
- 8) 温度计指示正确，整定值符合要求。
- 9) 冷却装置试运行正常，起动全部油泵（并测量油泵的负载电流），进行较长时间的循环后，多次排除残余气体。
- 10) 压力保护装置信号位置正确。

2 牵引变流器

通过改变电压、电流或频率的方法，将电能进行交流—

交流、交流一直流—交流、交流一直流、直流—交流、直流一直流等变换的设备称为变流器。将来自电网、牵引变压器或牵引发电机的电能进行变换后为牵引电动机供电的变流器称为牵引变流器。过去用旋转机组即电动机—发电机系统来实现交、直流间的变换或电压及频率的调节,后来也用通过引燃管及水银整流器,但这两种方法都不理想,故障率高,质量、体积及噪声指标都不好,用半导体元件构成的变流器很好地解决了这个问题。

对于牵引变流器要求有如下特点:

(1) 要有宽的调速范围和大的输出功率,满足现代机车车辆高速、重载运输的要求。要求起动力矩大,加(减)速调节快,具有良好的“牛马”特性,加(减)速平稳性和乘客舒适性。

(2) 有良好的稳定性和快速动态响应性能。由于机车车辆在运行过程中速度的变化,使牵引变流器的负载变化很大,所以要求变流器不管在轻载或重载下,在整个调节范围内保持良好的稳定性和动态响应性能,并要求有较强的过载和承受冲击的能力。

(3) 谐波小,效率高。变流器在对电能的处理过程中会产生一定的谐波,输出谐波在牵引电动机中将以热的形式消耗掉,使牵引电动机发热,影响牵引电动机的可靠运行。变流器产生的谐波也会反馈回电网,对电网造成干扰,要求反馈到电网的谐波越小越好。所以,输入、输出谐波是考核变流器的性能之一。对网侧变流器的功率因数要求越高越好,这样电网传输的无功损耗就小。变流器的效率高,则损耗小,散热容易,体积重量下降,且节约能量。

(4) 可靠性高,寿命长。对牵引提出的可靠性要求越来越高,需要各种功能完善的保护措施,对机车车辆的寿命要求为30年。

(5) 再生制动在现代牵引系统中是必不可少的,所以要求牵引变流器可以逆向运行。

2.1 主要器件

构成变流器的主要器件有电力电子器件、储能器件、各种高低压电器、检测器件、控制电路以及冷却部件等。

2.1.1 电力电子器件

可直接用来处理电能的电子器件称为电力电子器件。1956年,第一只晶闸管问世,为电力电子技术奠定了基础。经过几十年的发展,以晶闸管为核心的变流技术日臻成熟,各种派生器件如快速晶闸管、逆导晶闸管、不对称晶闸管、双向晶闸管等形成了传统电力电子器件的庞大家族,广泛应用于牵引变流器中,主要有整流器、斩波器等,对直流电动机进行调速。随着技术的进步,整流技术已不能满足对电力处理的要求,变流技术已从顺变时代进入到逆变时代,而传统电力电子器件的发展已趋于停滞状态,需要复杂的关断电路的半控型特性,使变流装置的体积和质量居高不下,牵引变流器的发展受到极大的限制。

微电子技术与电力电子技术的互补,衍生出品种繁多的新型电力电子器件,如GTO、GTR、MOSFET、IGBT、MCT、SIT等,这些器件有全控化、集成化、高频化等优良特性,推动了现代电力电子技术的蓬勃发展。20世纪70年代末,经过20多年的工艺改进,大功率GTO实用化,适合于变流器小型化、轻量化的要求。目前世界上大部分干线交流传动机车牵引变流器均采用GTO作为开关元件。近几年出现的集成型器件IGCT,在 dv/dt 、 di/dt 、驱动损耗、可靠性等方面,性能大大优于GTO,有取代GTO的趋势。

1985年诞生的IGBT开关元件,具有电力电子器件所需的各种优良性能,覆盖了原来由GTO及GTR占领的中小功率等级的变流器市场,并已在逐步向高压、大功率领域扩展。在1000kW以下的牵引变流装置中,IGBT已占统治地位,IGBT原有的一些缺点,通过工艺上的突破,已得到完善解决,3300V/1200A等级的器件已发展成熟,大量应用于城轨车辆的牵引变流装置中,4500~6500V的器件也在试用中。IGBT与GTO已成为变流器的主流开关元件。

利用硅材料制造半导体元件已有近半个世纪,大功率GTO实用化及IGBT的发明也已20多年,人们不断研究新的工艺方法及不同的器件结构来提高现有器件的性能。但用硅材料制成的器件其最大的缺陷是工作结温低,一般都在150℃以下,限制了器件的应用范围,对冷却也提出了较高的要求。于是,寻找新的材料来代替硅材料,是目前电力电子技术的一项重要任务。国外已研制出由碳化硅为材料的半导体元件,其工作结温可达500℃,如能在大功率器件中得到应用,那么可以减小或省去散热,使牵引变流器质量和体积下降,或者说使牵引变流器的容量得到提高,其意义非常重大。

电力电子器件一般都工作在开关状态,导通时通态阻抗很小,管压降很低,近似于短路,电流的大小取决于外电路;阻断时断态阻抗很大,漏电流极小,近似于开路,而管子两端的电压大小取决于外电路。电力电子器件的开关特性非常重要,可以说,其开关特性参数决定了器件的性能。

对于可控或半控器件,在主电路和控制电路之间需要有驱动电路对信号进行放大,控制电路按系统要求形成控制信号,通过驱动电路控制主电路中电力电子器件的通或断,来完成整个系统的功能。

电力电子器件按照能够被控制电路信号所控制的程度可分为3类,即全控型、半控型和不可控型。按照驱动电路加在器件门极和公共端之间信号的性质可分为2类,即电流驱动(从门极和公共端之间注入或抽出电流来控制导通或关断)和电压驱动(在门极和公共端之间施加电压来控制导通或关断)。电压驱动器件又称为场控器件或场效应器件,其原理是通过加在门极上的电压使器件产生可控的电场从而改变流过器件的电流大小和通断状态。按照器件内部电子和空穴2种载流子参与导电的情况可分为3类,即单极型、双极型和复合型。单极型由一种载流子参与导电,双极型由2种载流子参与导电,复合型则由单极型和双极型器件集成混合而成。

2.1.2 其他电器

2.1.2.1 电抗器

不同的牵引系统需要有不同的电抗器来完成滤波、均流、限流或升压等功能:在降压型直一直变流器中,需要滤波电抗器对变换后的直流电压进行滤波;对于升压型直一直变流器,用电抗器储存能量,以达到升高电压的目的;在交一直牵引系统中,交流电经整流器变换成直流电后存在较大的纹波,必须由平波电抗器进行滤波,然后供给直流电动机;当整流器的晶闸管并联时,需要均流电抗器使每个元件上的电流能够均衡;在交一直—交系统中,往往将交流输入电抗器集成到牵引变压器或牵引发电机中,以节省空间及成本;在交流单相供电的交一直—交系统中,往往在直流环节设置二次滤波环节,利用LC谐振电路滤除二次谐波,二次滤波电抗器可以单独设置,也可以集成在变压器内部;在直—交牵引系统中,需要电抗器来进行限流和滤波,防止设备之间或设备对电网的谐波干扰;在元件的应用电路中,往往

用电抗器组成吸收电路,限制元件的 di/dt 。

电抗器有铁心和空心之区别。交流应用时,一般用铁心电抗器,以减少用铜量,降低成本。直流应用时,多为空心电抗器。空心电抗器具有抗饱和能力,避免了铁心电抗器在饱和时阻抗急剧降低的缺点。

电抗器的主要技术指标有额定电压、额定电流、电感值和绝缘等级等。

2.1.2.2 电容器

在直传动系统中,一般只用电抗器进行平波,不用电容器。而在交流传动系统中,电容器使用非常普遍,在主变流器的中间直流环节,需要有支撑电容来维持直流电压的恒定。支撑电容主要有3个作用,即直流滤波、提供瞬时脉冲电流及提供电动机端的无功补偿。在交—直—交系统中,利用 LC 谐振电路,组成二次滤波环节。另外,在有些变流器中,电容器还作为吸收电路来抑制元件关断时的 du/dt 。

用于牵引的直流支撑电容及二次滤波电容一般都用电力电子电容器,其绕制电容元件的薄膜一般为带熔丝的铝复合安全膜,其可靠性及寿命指标都很好。电容器内部冷却一般用充油、充气或固态填充剂等方法。硅油有较好的阻燃性,是首选的冷却介质;充气一般用氮气或 SF_6 气体;固体填充剂则用绝缘导热脂或环氧树脂。在 IGBT 变流器中使用的电容器要求低的寄生电感。

电容器的主要技术指标有额定电压、电容值、额定电流、最大工作电流、峰值电流、峰值电压、对壳耐电压、端子间试验电压、损耗角、寄生电感值、工作温度范围、周围空气湿度、质量、预期寿命、液体介质和极间固体绝缘介质等。

2.1.2.3 电压传感器和电流传感器

牵引系统采用的电压、电流传感器一般都为霍尔传感器,具有很高的精度和很快的动态响应,非常适合变流器应用。

电压传感器技术指标有额定测量电压、过载能力、输入输出比、电源电压、绝缘电压、精度、线性度、响应时间和环境温度等。

电流传感器技术指标有额定测量电流、测量范围、额定输出电流、匝比、电源电压、绝缘电压、精度、线性度、响应时间和环境温度等。

2.1.2.4 接触器和继电器

变流器中应用的接触器和继电器与传统牵引电器中应用的类似,请参阅本章第6节“牵引电器”。

2.1.3 牵引变流器的模块化

由于历史原因,我国直传动牵引系统的整流器型号较多,甚至同一种型号的机车有几种不同的整流器,构成了复杂的型谱。随着半导体器件技术的进步,电力机车从 SS_1 到 SS_9 ,内燃机车从 DF_1 到 DF_{11} ,经过了几十年的发展历程,整流器使用的晶闸管或整流二极管从 1in 元件发展到 5in 元件,散热器也有铝散热器、铜散热器、热管散热器等多种。众多的整流器型号使生产、运行维护和管理成本增加,所以有必要对目前的型谱进行简化。

使用了许多新技术的现代交流传动牵引系统,牵引变流器主要由新型器件 GTO 及 IGBT 构成,器件的品种相对来说要少些,如 GTO 主要为 4500V/3000A 的元件,IGBT 则多为 3300V/1200A 或 1700V/2400A 等几种。“中华之星”及 DJ_1 机车用 4500V/3000A 的 GTO,“中原之星”及 200km/h 电动车组用 3300V/1200A 的 IGBT。它们都采用了模块化技术,模块化的优点是维护方便,减少了检修时间,

提高了检修效率,降低了运行成本。

2.2 直—直变流器

直—直变流器也叫直流斩波器,专指将某一直流电压直接变为另一直流电压的设备,它不包括直—交—直变流器。直流斩波器按不同的用途和电路结构可分为降压斩波器、升压斩波器、升降压斩波器、四象限斩波器、多相多重斩波器等。

在牵引系统中降压斩波器用途最为广泛,一般用于直流电网供电的直流牵引电动机调速。当功率较大时,往往用多重多相的电路结构来实现。为了达到反向运行或能量反馈的目的,也就是实现电流可逆的需要,则采用四象限斩波器。

斩波器的主要特点是电路结构简单,造价比交流传动低,而性能又优于调阻变速。在早期的直—直牵引系统中,起动和调速是在电源和电动机之间串联可变的电阻器,以改变对电动机的供电电压达到调速的目的,这不仅大量消耗能源,也不能实现连续平滑调速。为了增加级位,需要很多大功率电阻和有触点电器进行切换,可靠性和寿命不高,我国原来的一些城市有轨电车及第一代北京地铁车辆使用的就是调阻方式。

自从大功率晶闸管问世以来,直流斩波技术代替了调阻技术,除节能环保外,实现了平稳起动和无级调速,提高了列车的舒适度,并可充分利用黏着,提高了列车的牵引性能,其可靠性也大大提高,更为关键的是实现了再生制动。随着电力电子技术的进步,晶闸管斩波器又被 GTO 或 IGBT 斩波器所代替,如上海地铁一号线车辆采用的就是 GTO 斩波器。

2.2.1 降压型直流斩波器

如图 2.3-38 所示,用一个理想开关对电路进行通断切换,可得到一系列的矩形脉冲波,改变开关的开、合时间比例,即可改变负载上的平均电压,这就是直流斩波器的基本原理。实际的斩波器则利用半导体器件代替理想开关,由于晶闸管的半控型特性,使换流电路过于复杂,现代斩波电路基本上已被 GTO、IGBT 等全控型器件所代替。如果图 2.3-38 中的 IGBT 有规则地开通和关断,每次导通的时间为 t_{on} ,关断的时间为 t_{off} ,则

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (2.3-18)$$

式中: T 为斩波周期,而将 $\alpha = t_{on}/T$ 为导通比,由此可见,负载电压的平均值可由式 (2.3-19) 表示,即

$$U_0 = Et_{on}/T = \alpha E \quad (2.3-19)$$

调节 α 即可调节负载电压的平均值,称之为导通比控制,导通比控制可以用如下 3 种不同的方法来实现:

(1) 脉宽调制方式,即 PWM 方式,也称定频调宽,改变导通时间 t_{on} ,而斩波周期 T 不变。

(2) 频率调制方式,即定宽调频,保持 t_{on} 为常数,改变斩波周期 T 。

(3) 脉宽和频率的综合控制,即改变频率的同时改变脉冲的宽度,一般是分段改变斩波周期,而连续改变脉宽。

如图 2.3-38 所示,在 $t=0$ 时刻驱动 VT 导通,电源 E 向负载供电,负载电压 $U_0=E$,负载电流 i_0 按指数曲线上升。在 $t=t_1$ 时刻控制 VT 关断,负载电流经二极管 VD 续流,负载电压 u_0 近似为零,负载电流呈指数曲线下降。为了使负载电流连续且脉动小,通常使串接的电感 L 值较大。

当电流连续时,负载电压平均值为

$$U_0 = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T} E = \alpha E \quad (2.3-20)$$

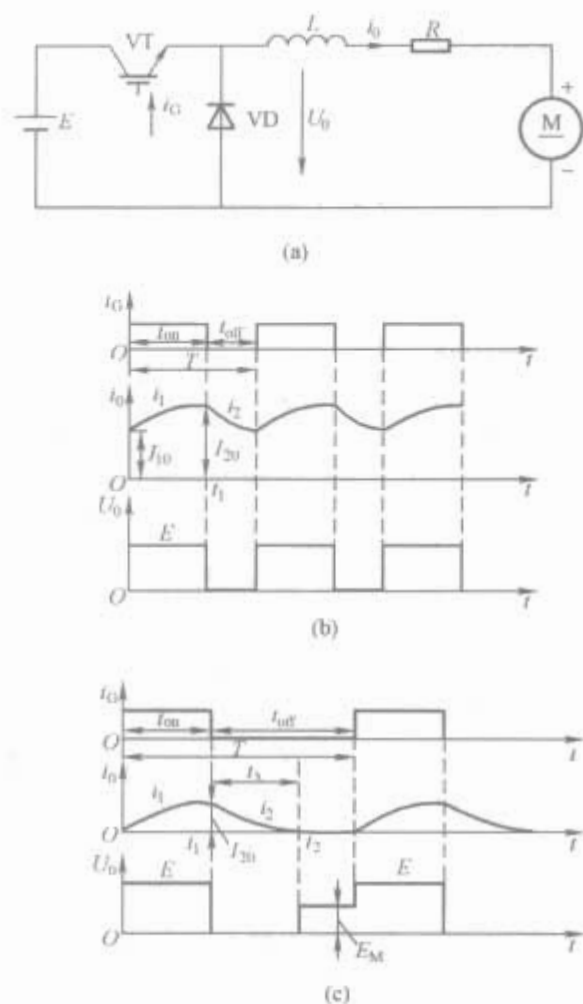


图 2.3-38 降压斩波电路的原理图及波形

(a) 电路图；(b) 电流连续的波形；

(c) 电流断续时的波形

式中： t_{on} 为 VT 导通的时间； t_{off} 为 VT 关断的时间； α 为导通比。

负载电压 U_0 最大为 E ，减小导通比 α ， U_0 随之减小，所以将该电路称为降压斩波电路。

负载电流平均值为

$$I_0 = \frac{U_0 - E_M}{R} \quad (2.3-21)$$

电流断续时， U_0 被抬高，一般不希望出现。

下面介绍降压斩波电路通断状态下电路的电压方程。

VT 通态期间，设负载电流为 i_1 ，可列出式 (2.3-22)，即

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + E_M = E \quad (2.3-22)$$

设此阶段电流初值为 I_{10} ， $\tau = L/R$ ，解式 (2.3-22) 得

$$i_1 = I_{10} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E - E_M}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.3-23)$$

VT 断态期间，设负载电流为 i_2 ，可列出式 (2.3-24)，即

$$L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 + E_M = 0 \quad (2.3-24)$$

设此阶段电流初值为 I_{20} ，解式 (2.3-24) 得

$$i_2 = I_{20} e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{E_M}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.3-25)$$

$$I_{10} = i_2(t_2) \quad (2.3-26)$$

当电流连续时

$$I_{20} = i_1(t_1) \quad (2.3-27)$$

即 VT 进入通态时的电流初值就是 VT 在断态阶段结束时的电流值；反过来，VT 进入断态时的电流初值就是 VT 在通态阶段结束时的电流值。

由式 (2.3-23)、式 (2.3-25)、式 (2.3-26) 和式 (2.3-27) 得出

$$I_{10} = \left(\frac{e^{t_1/\tau} - 1}{e^{T/\tau} - 1} \right) \frac{E}{R} - \frac{E_M}{R} = \left(\frac{e^{\rho} - 1}{e^{\rho} - 1} - m \right) \frac{E}{R} \quad (2.3-28)$$

$$I_{20} = \left(\frac{1 - e^{-t_1/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} \right) \frac{E}{R} - \frac{E_M}{R} = \left(\frac{1 - e^{-\rho}}{1 - e^{-\rho}} - m \right) \frac{E}{R} \quad (2.3-29)$$

其中

$$m = E_M/E$$

$$\rho = T/\tau$$

$$t_1/\tau = \left(\frac{t_1}{T} \right) / \left(\frac{T}{\tau} \right) = \alpha \rho$$

由图 2.3-38 (b) 可知， I_{10} 和 I_{20} 分别是负载电流瞬时的最小值和最大值。把式 (2.3-26) 和式 (2.3-27) 用泰勒级数近似，可得

$$I_{10} \approx I_{20} \approx \frac{(\alpha - m)E}{R} = I_0 \quad (2.3-30)$$

式 (2.3-30) 表示了平波电抗器 L 为无穷大、负载电流完全平直时的负载电流平均值 I_0 ，此时负载电流最大值、最小值均等于平均值。

从能量传递关系出发进行推导，由于 L 为无穷大，故负载电流维持为 I_0 不变，电源只在 VT 处于通态时提供能量，为 $E I_0 t_{on}$ ，在整个周期 T 中，负载一直在消耗能量，消耗的能量为 $(R I_0^2 T + E_M I_0 T)$ 。一周期中，忽略损耗，则电源提供的能量与负载消耗的能量相等，即

$$E I_0 t_{on} = R I_0^2 T + E_M I_0 T \quad (2.3-31)$$

则

$$I_0 = \frac{\alpha E - E_M}{R} \quad (2.3-32)$$

在上述情况中，均假设 L 值为无穷大、负载电流平直的情况。在这种情况下，假设电源电流平均值为 I_1 ，则

$$I_1 = \frac{t_{on}}{T} I_0 = \alpha I_0 \quad (2.3-33)$$

其值小于等于负载电流 I_0 ，由式 (2.3-33) 得

$$E I_1 = \alpha E I_0 = U_0 I_0 \quad (2.3-34)$$

即输出功率等于输入功率，可将降压斩波器看作直流降压变压器。

在负载电流断续的情况下， $I_{10} = 0$ ，且 $t = t_x$ 时， $i_2 = 0$ ，利用式 (2.3-26) 和式 (2.3-25) 可求出 t_x 为

$$t_x = \tau \ln \left[\frac{1 - (1 - m)e^{-\rho}}{m} \right] \quad (2.3-35)$$

电流断续时， $t_x < t_{off}$ ，由此得出电流断续的条件为

$$m > \frac{e^{\rho} - 1}{e^{\rho} - 1} \quad (2.3-36)$$

对于电路的具体工况，可据此式判断负载电流是否连续。

在负载电流断续工况下，负载电流一降到零，续流二极管 VD 关断，负载两端电压等于 E_M 。输出电压平均值为

$$U_0 = \frac{t_{on} E + (T - t_{on} - t_x) E_M}{T} = \left[\alpha + \left(1 - \frac{t_{on} + t_x}{T} \right) m \right] E \quad (2.3-37)$$

U_0 不仅与导通比 α 有关，也与反电动势 E_M 有关。

此时负载电流平均值为

$$I_0 = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_{on}} i_1 dt + \int_0^{t_x} i_2 dt \right) = \left(\alpha - \frac{t_{on} + t_x}{T} m \right) \frac{E}{R} = \frac{U_0 - E_M}{R} \quad (2.3-38)$$

2.2.2 升压型直流斩波器

升压型斩波电路如图 2.3-39 所示, 假设 L 和 C 足够大, VT 导通时, E 向 L 充电, 充电电流为 I_1 , 同时 C 的电压向负载供电, 因 C 值很大, 输出电压 u_0 为恒值, 记为 U_0 。设 VT 导通的时间为 t_{on} , 此阶段 L 上储存的能量为 $E I_1 t_{on}$ 。

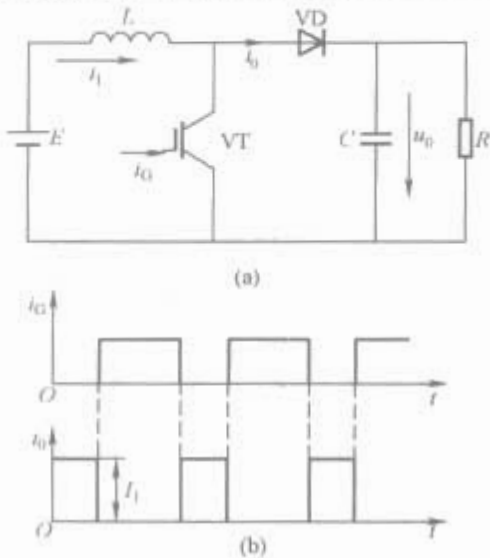


图 2.3-39 升压斩波电路及其工作波形
(a) 电路图; (b) 波形

VT 关断时, E 和 L 共同向 C 充电并向负载 R 供电。设 VT 关断的时间为 t_{off} , 则此期间电感 L 释放能量为 $(U_0 - E) I_1 t_{off}$ 。

稳态时, 一个周期 T 中 L 储存的能量与释放的能量相等, 即

$$E I_1 t_{on} = (U_0 - E) I_1 t_{off} \tag{2.3-39}$$

得

$$U_0 = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T}{t_{off}} E \tag{2.3-40}$$

因为 $T/t_{off} \geq 1$, 所以输出电压高于电源电压, 故称该电路为升压斩波电路。 T/t_{off} 称为升压比, 调节其大小即可改变 U_0 的大小。将升压比的倒数记作 β , 即 $\beta = t_{off}/T$ 。 β 和导通比 α 有如下关系

$$\alpha + \beta = 1 \tag{2.3-41}$$

所以

$$U_0 = \frac{1}{\beta} E = \frac{1}{1-\alpha} E \tag{2.3-42}$$

升压斩波电路能使输出电压高于电源电压的原因是 L 储能之后具有使电压泵升的作用, 而电容 C 可将输出电压保持住。

以上分析中, 认为 VT 通态期间因电容 C 的作用, 使输出电压 U_0 不变。但实际 C 值不可能无穷大, 在此阶段向负载放电, U_0 必然会有所下降, 故实际输出电压会略低。如果忽略电路中的损耗, 则由电源提供的能量仅由负载 R 消耗, 即

$$E I_1 = U_0 I_0 \tag{2.3-43}$$

式 (2.3-43) 表明, 与降压斩波电路一样, 升压斩波电路也可看成是直流变压器。

根据电路结构并结合式 (2.3-38) 得出输出电流的平均值 I_0 为

$$I_0 = \frac{U_0}{R} = \frac{1}{\beta} \frac{E}{R} \tag{2.3-44}$$

由式 (2.3-41) 即可得出电源电流 I_1 为

$$I_1 = \frac{U_0}{E} I_0 = \frac{1}{\beta^2} \frac{E}{R} \tag{2.3-45}$$

实际电路中电感 L 值不可能为无穷大, 因此该电路和

降压斩波电路一样, 也有电流连续和断续两种工作状态。

升压斩波电路的典型应用是直流电动机再生制动时把电能回馈给直流电源, 此时电动机的反电动势相当于图 2.3-38 所示电路中的电源, 而此时的直流电源相当于图 2.3-38 所示电路中的负载。由于直流电源的电压基本是恒定的, 因此不必并联电容器。

2.2.3 多相多重直流斩波器

多相多重斩波电路是在电源和负载之间接入多个结构相同的基本斩波电路而构成的。相数指一个控制周期中电源侧的电流脉波数, 重数是指负载电流脉波数, 图 2.3-40 所示为三相三重降压斩波电路。

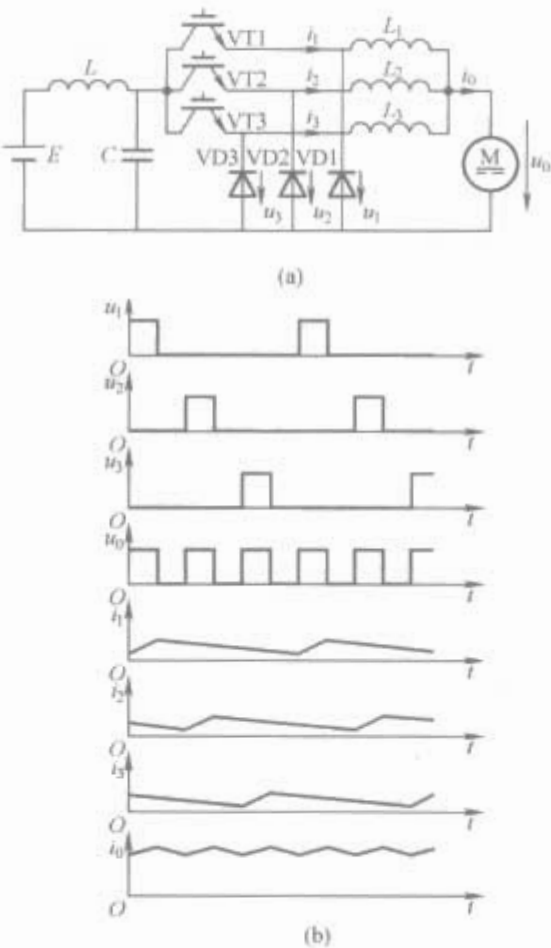


图 2.3-40 多相多重斩波电路及波形
(a) 电路图; (b) 波形

该电路由 3 个降压斩波电路并联而成, 总输出电流为 3 个斩波电路输出电流之和, 其平均值为每个电路输出电流平均值的 3 倍, 脉动频率也为 3 倍。由于 3 个单元电流的脉动幅值互相抵消, 总的输出电流脉动幅值变得很小。总输出电流最大脉动率 (电流脉动幅值与电流平均值之比) 与相数的平方成反比。与单相时相比, 设输出电流最大脉动率一定时, 所需平波电抗器总质量大为减小。当上述电路电源公用而负载为 3 个独立负载时, 为三相一重斩波电路。而当电源为 3 个独立电源, 向一个负载供电时, 为一相三重斩波电路。多相多重斩波电路还具有备用功能, 各斩波电路单元可互为备用。

2.2.4 四象限直流斩波器

在上述的斩波电路中, 输出电压的极性和电流方向都不能改变。在牵引应用场合, 机车车辆有前进、后退及制动等工况, 当需要牵引电动机作相应的正转、反转以及牵引和发电运行时, 需要改变电压和电流的极性和方向。

电流可逆斩波电路如图 2.3-41 所示, 由降压斩波电路和升压斩波电路两部分组成, 电流可正可负, 但电压极性不变, 即工作于第 1 象限和第 2 象限。VT1 和 VD1 构成降压斩波电路, 由电源向直流电动机供电, 电动机为牵引运行, 工作于第 1 象限; VT2 和 VD2 构成升压斩波电路, 把直流

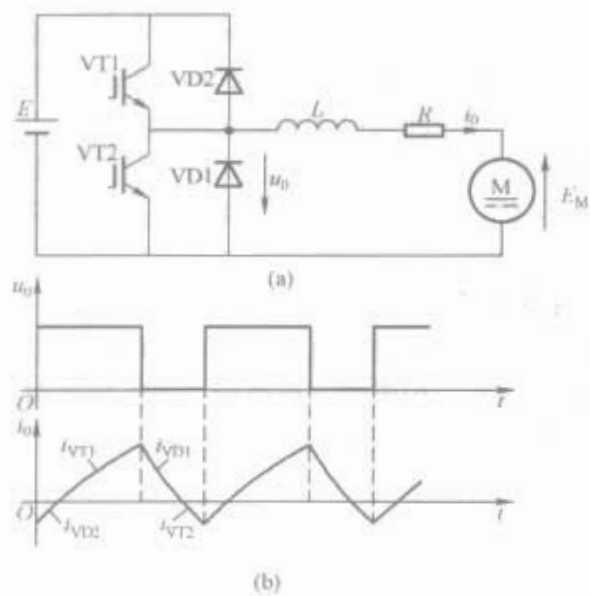


图 2.3-41 电流可逆斩波电路及波形
(a) 电路图；(b) 波形

电动机的动能转变为电能反馈到电源，使电动机作再生制动运行，工作于第 2 象限。

由两个电流可逆斩波电路组合构成的四象限斩波电路，可向电动机提供正向和反向电压及电流，满足牵引要求，如图 2.3-42 所示。由图可知，当 VT4 保持导通，VT1、VD1 和 VT2、VD2 构成一组电流可逆斩波电路，向电动机提供正电压，工作于第 1、2 象限，即正转牵引和正转再生制动工况；当 VT2 保持导通时，VT3、VD3 和 VT4、VD4 构成另一组电流可逆斩波电路，向电动机提供负电压，工作于第 3、4 象限。

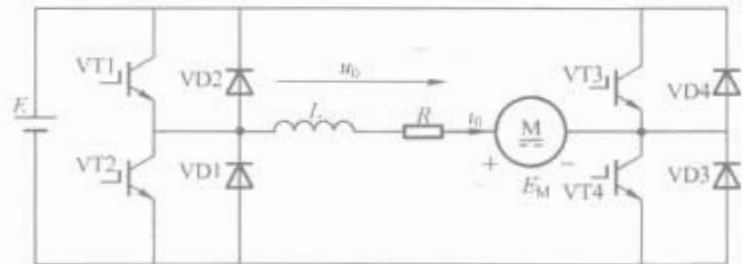


图 2.3-42 四象限斩波电路

2.3 交一直变流器

2.3.1 分类

交一直变流器也称整流器，其主要作用是将交流电压变换成直流电压。整流电路按组成的开关元件分为三类：不可控、半控和全控。不可控整流电路的开关元件全部由二极管组成，一旦主电路结构确定，其直流整流电压和交流电源电压的比值就固定不变；全控整流电路的所有开关元件都是可控的（如晶闸管、IGBT 等），其输出直流电压的平均值和极性可以通过控制开关元件的导通相位来调节，其电能既可以由交流电源向直流负载传输，也可以由直流负载反馈给交流电源，即所谓的有源逆变；半控整流电路的开关元件由可控元件和二极管混合组成，在这种电路里，输出直流电压的平均值可以改变，但极性不能改变。此外，整流电路按电路结构可分为桥式电路和中抽式电路；按交流电源输入相数可分为单相电路、三相电路和多相电路；按控制方式又可分为相控式电路和斩控式电路。

干线电力机车或电动车组通常采用单相高压交流接触网供电。内燃机车或内燃动车组由柴油机三相同步发电机组供电。采用三相交流电源有利于减小发电机的体积和质量，改善直流输出电压的波形。采用直流传动的机车或动车组，交流电源经整流后直接向直流牵引电动机供电；采用交流传动

的机车和动车组，交流电源经整流后再逆变成变频变压的交流电压向牵引电动机供电。

2.3.2 不可控整流器

不可控整流器在铁路机车上主要用于内燃机车或内燃动车组，其电路结构通常为三相不可控桥式整流电路，这是因为其整流电路整流后的电压脉动较小，而且可使交流发电机获得较大的输出比功率。

2.3.2.1 三相不可控桥式整流电路的工作原理

图 2.3-43 所示为铁路内燃机车上常用的三相不可控桥式整流电路的原理图，图中 F 为三相同步牵引发电机，输出电压的频率与柴油机的转速成正比，输出电压的幅值则可以通过改变励磁电流和转速来控制。

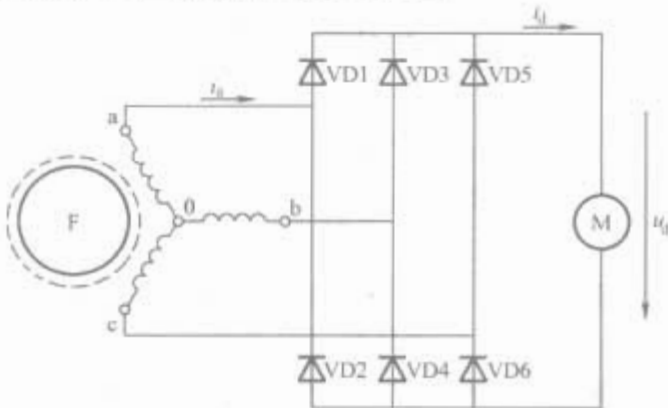


图 2.3-43 三相不可控桥式整流电路

整流电路的输出电压为三相电源线电压的包络线，一个周期内有 6 个脉波，在任何时候，总是由阳极接电压最高相（上桥臂）和阴极接电压最低相（下桥臂）的 2 个二极管串联导通，在各相电压的交点处自然换相；在一个周期内（ 2π ），每个二极管导通 $2\pi/3$ ，发电机每相绕组导通 2 次，正负各导通 $2\pi/3$ ；二极管所承受最高反向电压为输入线电压的峰值。

2.3.2.2 三相不可控桥式整流电路的参数计算

(1) 整流输出电压平均值。假定负载电感足够大，负载电流恒定不变，忽略二极管压降，不考虑整流电路交流回路中的电感和电阻（以下同），三相不可控整流电路输出为一个脉动的直流电压，其脉动频率为交流电源频率的 6 倍，按式 (2.3-46) 计算，即

$$U_d = 2.34U_s \tag{2.3-46}$$

式中： U_s 为同步发电机相电压的有效值。

若以线电压 U_{ab} 表示，则按式 (2.3-47) 计算，即

$$U_d = 1.35U_{ab} \tag{2.3-47}$$

(2) 二极管平均通态电流。按式 (2.3-48) 计算，即

$$I_{av} = I_d/3 \tag{2.3-48}$$

(3) 交流输入电流有效值。按式 (2.3-49) 计算，即

$$I_a = 0.816I_d \tag{2.3-49}$$

(4) 交流侧电抗对整流电路的影响。为了限制短路电流，牵引同步发电机的交流输出绕组具有一定的漏抗，此外，整流器的交流输入部分也存在电感，交流侧电抗的存在阻碍了输入电流的变化，使二极管（或晶闸管）的换流过程不可能瞬时完成，因而在换相过程中会出现两相同时导通的现象，也就是所谓的重叠导通。交流侧电抗的存在导致了整流输出电压的损失，损失的电压（换相压降）可按式 (2.3-50) 计算，即

$$\Delta U_d = \frac{3X_B I_d}{\pi} \tag{2.3-50}$$

式中： X_B 为同步牵引发电机每相电抗值。

2.3.3 可控整流器

可控整流器在铁路机车领域主要应用于电力机车或电动车组上。机车从电网获得的电源为单相交流电源，经牵引变压器降压后向整流器供电。

这里以不等分三段半控桥式整流电路举例说明，该电路广泛应用于SS_{3B}、SS_{4B}、SS₈、SS₉等电力机车，具有结构简单、控制方便等特点，因而被大部分交—直流传动电力机车所采用，其主要功能是：

- (1) 相控整流，将牵引变压器送来的交流电整流为直流电输出，供牵引电动机使用。
- (2) 机车高速运行时，实现牵引电机的无级磁场削弱。
- (3) 制动时续流和低速制动运行时的加馈制动。

不等分三段半控桥式整流器主电路见图2.3-44，它由2个串联桥组成。交流侧电源分为三部分，其中a1x1、a2x2为牵引变压器二次侧的2个牵引绕组，b1为绕组a1x1的中间抽头，绕组a1x1和a2x2的电压相等，a1b1和b1x1的电压为a1x1的一半。VD5、VD6、VT7、VT8为磁场削弱电路，电机达到额定电压前VT7、VT8不开通。下面就机车处于不同运行工况时，对整流电路的工作原理进行分析。

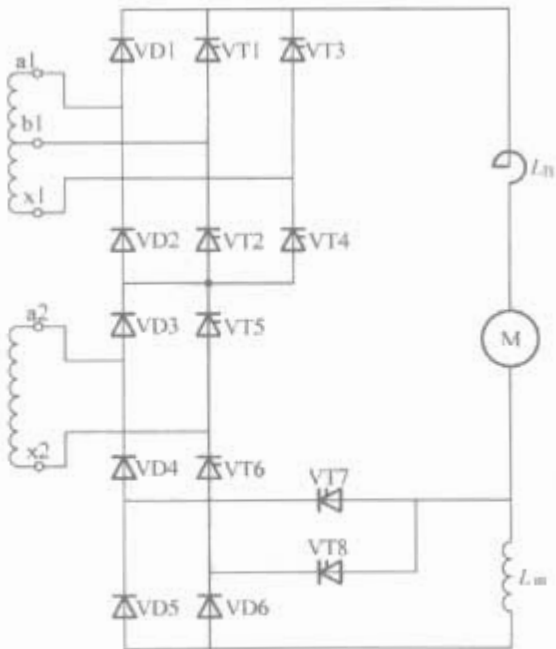


图 2.3-44 不等分三段半控桥式整流电路

(1) 低速阶段。此阶段仅由VD3、VD4、VT5、VT6组成的大段桥提供相控电源，VT1~VT4、VT7、VT8关断，VD1、VD2、VD5、VD6起续流作用。假定直流输出端平波电抗器L_B的电感值无穷大，直流负载电流连续且平直(以下同)，则直流输出电压平均值U_d为

$$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (2.3-51)$$

设定U_d^{*} = 2 × 0.9U₂，则在此阶段，当相控角由180°变为0°时，整流电压由0逐渐上升至U_d^{*}/2。

(2) 中速阶段。当晶闸管VT5、VT6接近满开放时，投入a1b1段桥，即交替开通VT1、VT2，同时保持VT5、VT6满开放，VT3、VT4、VT7、VT8继续关断，此时a2x2段桥为不可控整流，此时整流器的直流输出电压平均值U_d为

$$U_d = \frac{5 + \cos \alpha}{8} U_d^* \quad (2.3-52)$$

在此阶段，当相控角由180°变至0°时，整流电压由U_d^{*}/2逐渐上升至3U_d^{*}/4。

(3) 高速阶段。当晶闸管VT1、VT2接近满开放时，为使整流电压进一步升高，将a1x1全段桥投入，即交替开通VT3、VT4，同时保持VT1、VT2、VT5、VT6满开放，

VT7、VT8继续关断，此时整流器的直流输出电压平均值U_d为

$$U_d = \frac{7 + \cos \alpha}{8} U_d^* \quad (2.3-53)$$

在此阶段，当相控角由180°变为0°时，整流电压由3U_d^{*}/4逐渐上升至U_d^{*}，但实际使用中相控角变化受牵引电机额定电压限制。

(4) 磁场削弱。在励磁电流产生的磁场作用下，驱动轮对的直流牵引电动机电枢会感应出电动势E。该电枢电动势与整流输出电压平衡，当整流器已经满开放，使直流输出电压已达最大值时，如果要继续提高机车的运行速度，也就是说提高电动机的转速，就必须减小电动机的磁通量，这就是磁场削弱。

在原满磁场控制的基础上，通过控制晶闸管VT7、VT8的通断，使部分负载电流分流，从而减小牵引电动机的磁通，实现机车的高速运行，VT7、VT8导通的时间越长，励磁线圈被分流的时间越长，磁场削弱的程度越深。

(5) 加馈电制动。电力传动的机车一般都有电制动，机车从牵引工况转换到制动工况时，其主电路结构会有一些的改变，简化后的主电路见图2.3-45。牵引电动机的励磁方式由串励改为他励，由整流器的第二段桥供电，电动机的电枢电路除串有制动电阻外，还串入了一段整流桥，通过改变励磁电流的方向，牵引电动机电枢在轮对的驱动下，会产生一个与牵引工况极性相反的感应电动势。

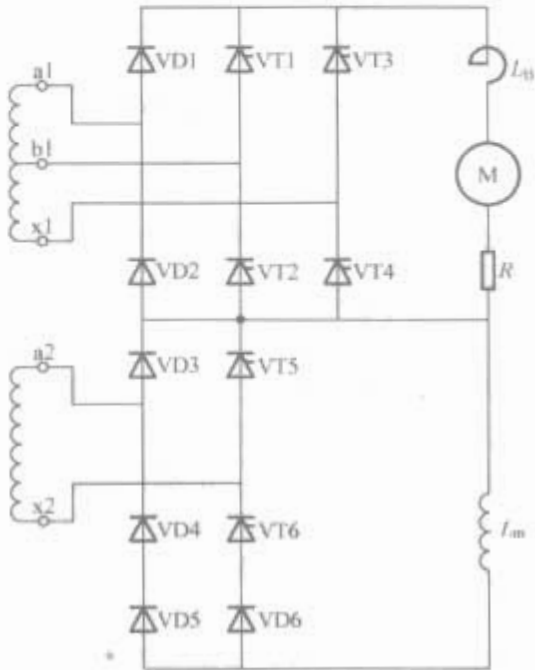


图 2.3-45 加馈电阻制动主电路

当机车在高速运行时进行制动，此时感应电动势很高，受整流元件、制动电阻、电枢电流的最大值限制，与电枢串联整流桥的整流电压必须为零，即晶闸管处于封锁状态，制动电流通过整流桥的二极管续流。随着机车速度的降低，通过提升整流器第二段桥(a2x2)的整流电压，增加电动机的励磁电流，从而维持机车的制动力。

当机车速度进一步降低时，励磁电流已达最大值，为维持机车的最大制动力，应保持最大的制动电流*r*₀。随着机车速度的降低，牵引电动机电枢的感应电动势不足以维持最大制动电流，此时投入绕组a1x1，交替导通第一段桥的晶闸管，相当于牵引电动机电枢电动势再正向串入了一个整流电压，通过调节整流电压的大小就可以控制制动电流的大小，以维持最大制动电流，维持机车制动力，称之为加馈电制动。

2.3.4 四象限变流器

四象限变流器是应用脉宽调制技术(PWM)发展起来

的一种新型整流器,既可以将电网输入的交流电整流为直流电输出,也可将直流电逆变成交流电,回馈到电网中去。也就是说,变流器能够很方便地在整流和逆变的四个象限内运行,同时它从电网获得的电流近似为正弦波,且与电网电压同相(牵引运行时)或反相(制动运行时),最大限度地降低了变流器对电网的污染。

目前在铁路牵引领域应用的四象限变流器主要为电压型,图2.3-46所示为电压型四象限变流器的电路原理图,其中VT1~VT4为IGBT元件,VD1~VD4为IGBT模块内集成的反并联二极管, u_N 为牵引变压器二次侧电压, L_N 和 R_N 分别为折算到二次侧的牵引变压器漏感和电阻; L_2 和 C_2 组成谐振电路,用于滤除整流器输出电流中二次谐波成分; C_d 为中间直流环节支撑电容。VD1~VD4构成桥式整流电路,将电网交流电变换为直流,供给中间储能环节或直流负载;VT1~VT4组成的逆变电路可将中间直流环节或直流负载端的直流电变换成交流电,反馈回电网。也就是说,四象限变流器的能量传输是可逆的,通过对其进行适当的控制,可使四象限变流器在整流(牵引)和逆变(制动)工况间自由切换。

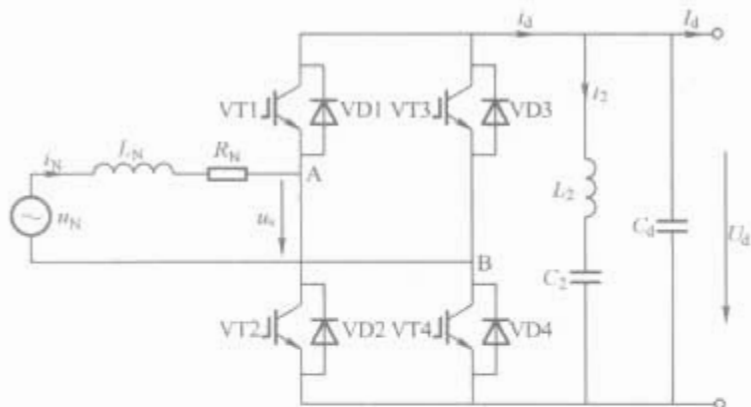


图 2.3-46 电压型四象限变流器的电路原理图

2.3.5 交一直变流器机组

2.3.5.1 相控整流器

相控整流器由于结构简单、成本低,且技术非常成熟,在铁路交一直流传动领域得到了广泛应用。由于应用场合不同,相控整流器的结构有所区别,但都可以划分为以下几个主要的功能单元,即柜体、主电路单元、散热单元、门极触发单元以及保护单元等。而主电路单元又可细分为电力电子器件(晶闸管、二极管)、电压和电流传感器、汇流母排等。

(1) 整流模块。整流模块将整流元件和散热器组合成一体,构成整流器的一个基本单元。整流模块通常包括整流元件、散热器、绝缘套管、垫块、弹簧钢板、钢珠、双头螺栓、紧固螺母等部件,通过特殊的工艺,在专用的压装机器上压装而成。在压装过程中,须保证半导体元件压装平整、平衡,受力适度、均匀,元件受力过大可能损坏元件内部芯片,压装力不够则可能导致元件正向压降增大,元件与散热器的接触热阻增加,从而使模块的散热能力下降。

整流元件可以是晶闸管或二极管,也可以是两者的组合。压装元件的数量可以是单个,作为主电路的一个元件,也可以是2个,作为主电路的一个相桥臂。整流模块采用铜、铸铝或热管散热器。

1) 整流元件选型。元件参数计算和型号预选。首先根据负载参数和电路结构,计算出整流元件承受的反向重复峰值电压和工作电流,综合考虑散热条件以及总体尺寸的要求,根据经验初步选用一种元件,确定桥臂需要串并联的元件数,然后再对其进行核算。

a. 桥臂串联元件数 n_s 。桥臂串联元件数 n_s 的计算公

式为

$$n_s = \frac{\sqrt{2}U_2 K_V K_G}{U_{RRM} K_i} \quad (2.3-54)$$

式中: U_2 为交流侧线电压有效值; K_V 为电源电压波动系数,取1.16~1.2; K_G 为过电压倍数,取2; K_i 为均压系数,取0.95。

b. 桥臂并联元件数 n_p 。桥臂并联元件数 n_p 的计算公式为

$$n_p = \frac{I_{av,max} K_L K_A}{I_{av} K_i} \quad (2.3-55)$$

式中: $I_{av,max}$ 为流过元件最大电流的平均值; K_i 为均流系数,取0.85; K_A 为安全系数,可取1.25; K_L 为线路系数。

c. 元件结温 T_j 的计算。首先计算元件的热损耗,按式(2.3-56)计算,即

$$P = U_{Fo} I_{av} + r_{Fo} I_{rms}^2 \quad (2.3-56)$$

式中: I_{av} 为流过元件电流的平均值; I_{rms} 为流过元件电流的有效值; U_{Fo} 为元件的门槛电压; r_{Fo} 为斜率电阻。

由损耗功率可以计算出元件的结温升为

$$\Delta T_{ja} = PR_{ja} = P(R_{jc} + R_{ch} + R_{hs}) \quad (2.3-57)$$

式中: R_{jc} 为元件结壳热阻; R_{ch} 为元件壳与散热器间的接触热阻; R_{hs} 为散热器热阻。

元件的结温 T_j 为

$$T_j = \Delta T_{ja} + T_e + T_a \quad (2.3-58)$$

式中: T_e 为运行时最高环境温度; T_a 为冷却风温升。

2) 计算实例。以DF_{8D}交流传动内燃机车主整流器为例说明。该机车轴式为C₀-C₀,标称装机功率为4800kW,每台机车配置一台主变流器。主变流器的主电路分为两个独立的单元,每个单元由一组三相不可控桥式整流器和三组逆变器组成,分别向一个转向架的3台牵引电动机供电。

现对其中一组整流器进行参数计算。已知:交流侧额定电压(线电压)为1326V,额定直流电流为1500A,短时最大直流电流为2000A。初步选定二极管的型号为ZPX2600-44,反向重复峰值电压 U_{RRM} 为4400V,正向平均电流 I_{AV} 为2610A,门槛电压 U_{Fo} 为0.94V,斜率电阻 r_{Fo} 为0.112mΩ,结壳热阻 R_{jc} 为0.01K/W,接触热阻 R_{ch} 为0.003K/W。则

①桥臂串联元件数

$$n_s = \frac{\sqrt{2}U_2 K_V K_G}{U_{RRM} K_i} = \frac{\sqrt{2} \times 1326 \times 1.12 \times 2}{4400 \times 0.95} = 1.005$$

桥臂串联元件数取 $n_s=1$ 比较合适。

②桥臂并联元件数

$$n_p = \frac{I_{AV,max} K_L K_A}{I_{AV} K_i} = \frac{2000 \times 1.1 \times 1.25}{3 \times 2610 \times 0.85} = 0.413$$

桥臂并联元件数取 $n_p=1$ 满足要求。

③元件结温计算。整流器电路为三相桥式整流,每个元件的导通角为 $2\pi/3$,根据式(2.3-56)可以计算出每个元件的热损耗,即

$$\begin{aligned} P &= U_{Fo} I_{AV} + r_{Fo} I_{rms}^2 \\ &= \left[0.94 \times \frac{2000}{3} + 0.112 \times 10^{-3} \times \left(\frac{2000}{\sqrt{3}} \right)^2 \right] W \\ &= 776W \end{aligned}$$

考虑最高运行环境温度为45℃,冷却风温升为10℃,散热器热阻为0.03K/W,则元件结温为

$$T_j=[45+10+(0.01+0.003+0.03)\times 776]^{\circ}\text{C}=88.4^{\circ}\text{C}$$

整流二极管允许的最高运行结温为 150℃，因此，该整流器选用的二极管在运行时尚有一定的温升裕量。

(2) 门极触发单元。晶闸管在阳极电位低于阴极电位时，可实现元件的自关断，如果需要将其从阻断状态转换为导通状态时，除了必须满足阳极电位高于阴极电位这一基本条件以外，还需在晶闸管的门极和阴极之间加上一个适当的正向电压和电流触发信号。门极触发单元的主要作用就是输出触发信号，触发晶闸管。

门极触发单元的技术要求：

1) 加在晶闸管阳极—阴极两端的触发信号必须为正极性。为了减少门极触发单元的功率损耗，触发信号一般采用脉冲形式。

2) 晶闸管的导通时间一般为 6μs 左右，为了保证晶闸管能够可靠开通，触发脉冲的宽度应大于 6μs。通常机车上采用的门极触发单元输出的单个触发脉冲宽度为 3~4ms。此外，为了使并联工作的多个晶闸管能够同时开通，要求触发脉冲的前沿要陡。

3) 触发脉冲的触发功率（电压、电流）必须满足晶闸管的触发要求，门极—阴极间触发脉冲的空载电压通常为 10~15V，触发脉冲的电流幅值约为 600~700mA。

4) 晶闸管的主电路部分与控制部分需进行电隔离，通常采用脉冲变压器来实现高低压电路的隔离，此外门极触发单元必须具有一定的抗电磁干扰能力，以免产生误触发。

(3) 保护单元。

1) 过电压保护。整流器的半导体元件在关断过程中，当其正向电流下降至零后，元件并不会马上停止导通，在反向电压的作用下，载流子进入复合过程，于是在反方向继续流过电流，直到载流子复合完毕，反向电流才会迅速衰减为零，元件截止。在反向电流衰减过程中，电路会产生强烈的换流过程，在元件两端产生很高的换流过电压，由于这部分过电压是由整流器自身产生的，因此，将其归类为内部过电压。通常通过在元件两端并联 RC 阻尼保护电路来限制换流过电压，选择合适的 RC 参数可以有效地保护整流器的安全运行。

2) 过电流保护。整流器过电流产生的原因包括由半导体元件击穿引起的桥臂贯通，或牵引电动机换向器环火、直流输出端接地引起的直流侧短路。由于整流器直流输出端通常串有很大的平波电抗器，所以直流侧短路电流通常有所抑制。真正对整流器运行威胁很大的是桥臂贯通引起的交流侧短路，因此，整流器的过电流保护主要是针对交流侧短路，对其采取的保护措施主要有主断路器或励磁接触器保护、熔断器保护。

2.3.5.2 四象限变流器

四象限变流器作为电力机车或电动车组的入端变流器（网侧变流器），通常与牵引逆变器（电动机侧变流器）集成在同一个机组内，构成一台完整的交—直—交变流器。

与相控整流器类似，四象限变流器也可以划分为以下几个主要的功能单元，即柜体、主电路单元、散热单元、门极驱动单元以及控制保护单元等。主电路单元又可细分为电力电子器件（IGBT）、支撑电容、二次滤波电感、二次滤波电容、接触器、充放电电阻、电压与电流传感器及汇流母排等。

(1) 变流器模块。模块化、标准化、简化设计代表了今后主变流器研制的发展趋势。通过模块化设计，可以缩短变流器的开发周期，降低研制成本，提高产品的可靠性、互换性和维护性。

通用化的变流器模块集成了 IGBT 元件、散热器、温度传感器、门极驱动单元、门极驱动电源、脉冲分配单元、支撑电容、低感母排等部件。开关元件在快速关断过程中其 di/dt 很大，产生较大的尖峰电压，其值为 $\Delta u=L_s(di/dt)$ ，其中 L_s 为线路中的杂散电感与元器件上的分布电感之和，所以一般在电路中需设置缓冲电路（吸收电路），以吸收元件关断时的过电压。目前新一代的 IGBT 元件其内部的分布电感已能控制在很小的范围内，如果电路上的杂散电感很小，那么省去吸收电路是可行的。变流器模块 IGBT 元件之间以及 IGBT 与支撑电容的连接使用低电感母排（Busbar），Busbar 的基本结构是多层母线层压而成，通过流过母线上的正负电流方向相反，来抵消线路上的差模杂散电感，其优点是省去了吸收电路，使电路更为简洁可靠。

变流器模块具有很强的通用性，既可用作四象限变流器，也可用作逆变器，还可作为斩波器来使用。此外，根据系统的安装空间和散热条件，变流器模块可选用铝散热器强迫风冷、热管散热器和水冷等多种冷却方式，其基本构件是通用的。

(2) 举例计算。

1) 主电路。以 200km/h 摆式电动车组主变流器举例计算。四象限变流器部分的主电路如图 2.3-47 所示，牵引变压器有 2 个二次牵引绕组，分别为 2 台四象限变流器供电。二重四象限变流器的波形错开 90°控制，以减小直流输出电压的谐波含量。在四象限变流器起动之前，交流电压通过充电接触器 K1、充电电阻 R_1 组成的充电回路，经二极管整流后对支撑电容 C_d 充电，充电完成后再闭合短接接触器 K3、K4，K2 和 R_2 构成快速放电回路，在变流器停机后可迅速将中间直流环节的电荷泄放掉。 L_2 、 C_2 构成二次谐振回路。

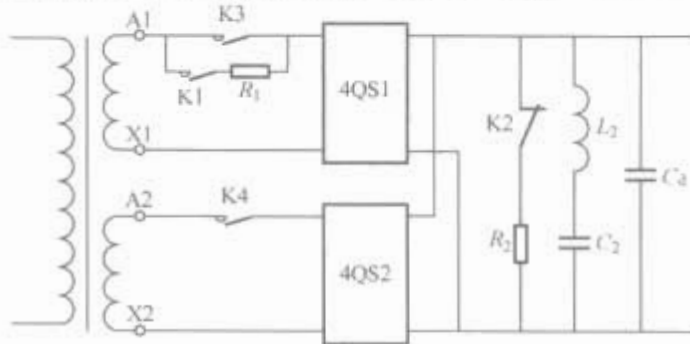


图 2.3-47 四象限变流器主电路

2) 参数计算。

已知：直流输出电压为 1800V；直流输出功率为 1240kW。

①不考虑交流侧电阻时，额定交流输入电压 U_N 为

$$U_N=\frac{mU_d}{\sqrt{2(1+\alpha^2)}}\tag{2.3-59}$$

假设牵引变压器短路阻抗的标么值 $\alpha=0.35$ ，额定工况运行时调制比 $m=0.8$ ，则额定交流输入电压为

$$U_N=\left[\frac{0.8\times 1800}{\sqrt{2\times (1+0.35^2)}}\right]\text{V}=961\text{V}$$

②额定交流输入电流 I_N 。每重四象限脉冲整流器的交流输入电流为

$$I_N=\frac{P_d}{2U_N\eta\cos\varphi}\tag{2.3-60}$$

式中： η 为整流器效率，取 0.99； $\cos\varphi$ 为四象限变流器输入功率因数，取 0.99。

$$\text{所以 } I_N=\left(\frac{1240\times 10^3}{2\times 961\times 0.99\times 0.99}\right)\text{A}=658\text{A}$$

系统要求在网压下降 10% 时, 四象限变流器能够输出额定功率, 因此, 交流输入电流的最大有效值 $I_{N\max}$ 为

$$I_{N\max} = I_N / 0.9 = (658 / 0.9) \text{ A} = 731 \text{ A} \quad (2.3-61)$$

③二次谐振回路电流。流过二次谐振回路电流的有效值 I_{d2} 为

$$I_{d2} = mI_N = (0.8 \times 658) \text{ A} = 526 \text{ A}$$

④IGBT 元件选型。IGBT 元件的电压和电流定额计算如下:

a. 电压定额计算

$$\begin{aligned} V_{CE} &= (U_{d\max} K_1 + \Delta U) K_2 \\ &= [(2000 \times 1.15 + 500) \times 1.1] \text{ V} \\ &= 3080 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.3-62)$$

式中: V_{CE} 为 IGBT 元件集电极与发射极两端承受的电压; $U_{d\max}$ 为直流环节最高电压, 取 2000V; K_1 为电压裕度系数, 取 1.15; K_2 为安全系数, 取 1.1; ΔU 为开关过电压, 取 500V。

b. 电流定额计算

$$\begin{aligned} I_C &= I_{AC\max} \sqrt{2} K_3 \\ &= (731 \times 1.414 \times 1.5) \text{ A} = 1550 \text{ A} \end{aligned} \quad (2.3-63)$$

式中: I_C 为流过 IGBT 元件集电极的电流; $I_{AC\max}$ 为最大交流输入电流; K_3 为电流尖峰系数, 取 1.5。

初步选择两个 3300V/1200A 的 IGBT 元件并联, 通过对元件的热损耗计算, 元件最高运行结温不超过 94℃, 表明所选 IGBT 元件是合适的。

⑤二次谐振电感、电容选型。二次谐振电容的计算公式为

$$C_2 = \frac{I_{d2}}{2\omega(U_{C2\max} - U_d)} \quad (2.3-64)$$

式中: ω 为交流输入电压角频率, 取 314; $U_{C2\max}$ 为电容器允许的最高工作电压。

综合考虑, 选取二次谐振电容的参数为 2000V/9mF, 从而得出谐振电感值为

$$L_2 = \frac{1}{(2\omega)^2 C_2} = \left(\frac{1}{628^2 \times 9 \times 10^{-3}} \right) \text{ mH} = 0.282 \text{ mH} \quad (2.3-65)$$

⑥支撑电容选型。支撑电容可按式 (2.3-66) 计算, 即

$$C_d = \frac{10P}{\omega U_d^2} = \left(\frac{10 \times 1240 \times 10^3}{314 \times 1800^2} \right) \text{ mF} = 12.2 \text{ mF} \quad (2.3-66)$$

2.4 中间直流环节

中间直流环节是前一级交一直变流器与后一级直—交变流器之间的连接纽带, 起到稳定中间直流环节电压以及与前两级变流器进行无功功率和谐波功率交换的作用。

铁路牵引领域电压型交—直—交变流器组成的电路结构的中间直流环节一般由两部分组成: 一是滤波电容器; 二是二次滤波电路, 即 2 倍于电网频率的串联谐振电路。由于单相电压型交一直变流器输出除了含有一个直流分量外, 还含有一个 2 倍于电网频率的交流分量, 这个交流成分就通过二次滤波电路流过, 而直流分量则流向下一级供给负载。

2.4.1 直流支撑电容器

直流支撑电容器是交—直—交变流器平稳直流电压的重要部件, 需要吸收掉来自中间直流环节两侧各自的交流纹波电流, 使中间直流环节保持为电压源特性。在大功率的交—

直—交功率变换中, 由于纹波电流很大, 要求直流支撑电容器的参数应具有较低的等效串联电阻 (ESR), 具有可承受高纹波电流有效值的特性。

在牵引传动领域, 除电感、电抗器等以磁储能之外, 中间直流支撑电容也是很重要的用来转换和控制功率的储能器件, 因此, 要求它能提供远高于有效值电流的峰值电流。

由于应用在牵引传动领域的特殊性, 要求中间直流支撑电容应具有极高的可靠性, 因此, 要求具有自愈性能, 即特殊情况下的电压击穿恢复和因此产生的不短路。

直流支撑电容往往要处理很高的电流和电压变化率, 因此, 需要尽可能低的寄生电感。一般这种电容器采用特殊的卷绕工艺和引出端子处理工艺, 以保障电容器的低电感和可靠性。

直流支撑电容在工作时将会产生比一般电容器更大的损耗, 因此, 需要将芯子中的热量以尽可能低的热阻传到电容器外面。为了良好导热, 在芯子和芯子与外壳之间的所有空隙都充满液体或固体浸渍剂。这样, 除了可以保证电容器内部的良好散热外, 也增加了电介质的介电强度。

牵引传动领域中间直流支撑电容的选择一般基于以下原则:

- (1) 对中间直流环节电压保持稳定, 峰—峰波动值不超过规定的允许值。
- (2) 中间直流环节直流电流是连续的, 没有间断, 其峰—峰值波动不超过规定的允许值。
- (3) 中间直流环节的损耗应保持最小。
- (4) 所选电容器的参数不会影响整个系统的稳定性。
- (5) 应能抑制逆变器和电动机中发生的暂态过程, 保持系统稳定。

2.4.2 二次滤波环节

在选择二次滤波回路的电感和电容值时, 除了考虑很大的谐振电流可能在电容器上产生过电压的危险外, 还必须考虑电抗器的结构尺寸和电感值。持续电流和最大电流有关, 而电容器的结构尺寸与电容值、最大电压与电容损耗有关。一般来说, 在满足条件的情况下可以先选定较大的电容值, 再选取电感器。所以, 适当选择参数将有助于减少费用, 提高系统性价比。国外也有在 1MVA 功率以下等级采用 PWM 控制来补偿二次谐波, 而省掉主电路二次滤波环节的应用。

2.4.2.1 二次滤波电路电容器 C_2 的选取

二次滤波电路电容器 C_2 和电感 L_2 选择的基本依据为

$$4\pi f_n = 1 / \sqrt{L_2 C_2} \quad (2.3-67)$$

式中: f_n 为电网频率。

由式 (2.3-67) 可以看出, 减小 C_2 , 必然要增加 L_2 , 而 C_2 过小, 将使 L_2 太大, 从而使二次滤波电抗器的质量和体积增大, 增加造价。此外, 由于 C_2 过小, 造成 C_2 上的电压过大。

电容器 C_2 上的电压为

$$U_{C2} = U_d + \sqrt{2} I_{d2} / 2\omega \times C_2 \quad (2.3-68)$$

如果要求 U_{C2} 要小于电容器的额定电压 U_C , 则 C_2 取值为

$$\begin{aligned} C_2 &\geq (\sqrt{2} I_{d2}) / [2\omega (U_C - U_d)] \\ &= (\sqrt{2} I_{d2}) / [4\pi f_n (U_C - U_d)] \end{aligned} \quad (2.3-69)$$

式中: I_{d2} 为二次滤波电路电流最大有效值; U_d 为中间直流环节电压额定值; U_C 为二次滤波电路电容器的额定电压值。

2.4.2.2 二次滤波回路电感 L_2 的选取

$$L_2 = 1 / [(4\pi f_n)^2 C_2]$$
 (2.3-70)

2.4.2.3 二次滤波电流有效值

$$I_{d2} = \frac{1}{2} m I_N$$
 (2.3-71)

式中： m 为调制比； I_N 为整流器输入电流。

2.4.3 电阻制动或过电压保护斩波环节

对于直—交传动的模式（即为直流电网输入），反馈到直流电网的能量可以部分被同一电网其他车辆消耗掉，但其他车辆不能完全消耗制动反馈的能量时，制动能量会使直流电压持续升高，当电压过高时可能会烧毁换流器件。因此，这种模式的中间直流环节需要设置电阻制动，通过电阻来消

耗制动能量，以获得持续的车辆制动力。

如图 2.3-48 所示，在交—直—交传动模式中，反馈到中间直流环节的能量可以通过四象限变流器全部反馈到交流电网。而当车辆出现空转、滑行或者受电弓处网压中断等的情况下，中间直流环节上可能出现瞬时过电压。为了防止这种过电压对主变流器造成损坏，在中间直流环节设有瞬时过电压限制电路（也称过电压保护斩波），由 IGBT 和限流电阻组成。这是一种多次重复方式的保护方法。当有过电压存在时，该 IGBT 将导通，中间直流环节能量经限流电阻放电和释放，消除过电压。

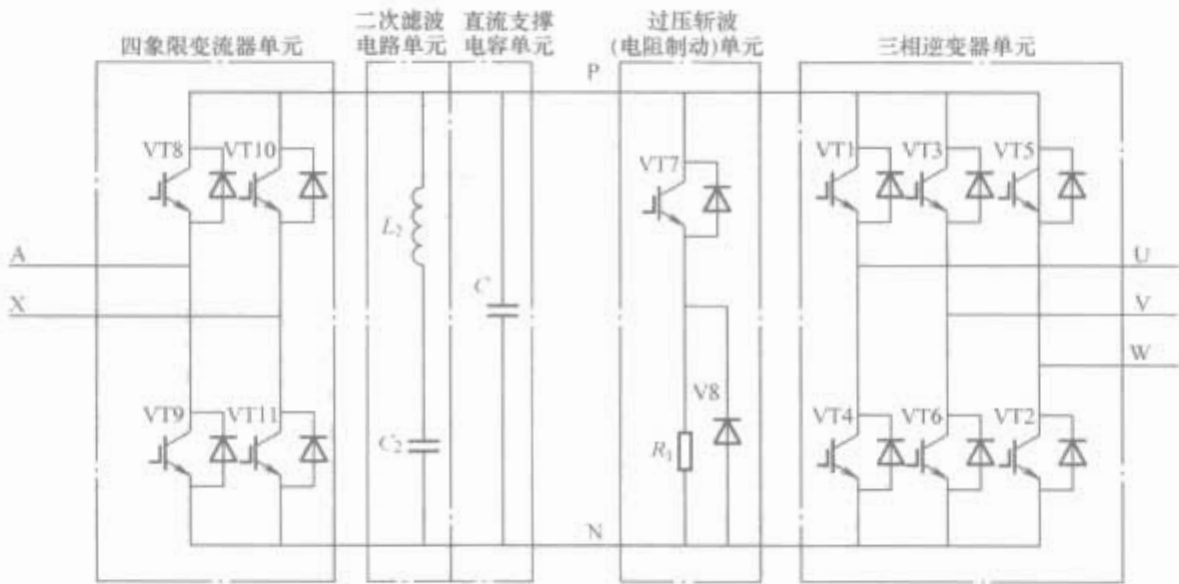


图 2.3-48 交—直—交主变流器原理示意

电阻值的选择主要考虑其瞬时功率要满足抑制由于牵引空转和制动滑行或网压中断所造成的直流网压上升，即

$$U_d^2 / R \geq P \text{ 或 } R \leq U_d^2 / P$$
 (2.3-72)

式中： U_d 为过电压斩波（或电阻制动）动作电压值； P 为牵引工况时或再生制动时最大功率； R 为过电压斩波（或电阻制动）所选电阻器的电阻值。

所选电阻值使斩波功率器件的峰值电流不超过器件的允许值，即

$$U_{dmax} / R \leq I \text{ 或 } R \leq U_{dmax} / I$$
 (2.3-73)

式中： U_{dmax} 为过电压斩波（或电阻制动）可能出现的直流最高电压值； I 为功率器件最大电流允许值。

2.5 直—交变流器（牵引逆变器）

将直流变成交流的变流器称为直—交变流器，又称逆变器。在机车车辆中常称为牵引逆变器。这里为了简单起见，简称逆变器。

对于大功率的电力机车及内燃机车而言，GTO 占据主导地位。如法国的 TGV、德国的 ICE 高速列车以及美国的大功率内燃机车等。而在中小功率的机车、城市有轨电车、动车组及地铁车辆等领域，IGBT 则愈来愈显示出其卓越的性能。

由于电力电子器件的发展特别是高压 IGBT 的问世和应用，在牵引传动领域，IGBT 越来越起到主导作用。从大功率的机车、动车组到地铁车辆、轻轨车辆、磁浮列车等应用场合，IGBT 得到最广泛的应用。逆变器未来的发展趋势是：

- (1) 基本确立逆变器以 IGBT（IPM）器件为开关元件。
- (2) 功率密度大、轻量化、低能耗设计。
- (3) 模块化结构设计。

- (4) 主传动逆变器和辅助逆变器采用集成一体化设计。
- (5) 低噪声，良好的电磁兼容性能，产品朝着环境友好型方向发展。
- (6) 大功率牵引逆变器冷却方式以高效环保的水冷散热或热管散热为发展方向。

目前，逆变器在世界上的发展呈现大功率化、高频化、高效化，电路结构简单化的趋势。自从 1200kVA 逆变器在 DWA1 地铁工程维护车上装车以来，各型逆变器已陆续在“中原之星”动车组、DF7CJ 内燃机车、磁浮动车、国产化地铁车辆、北京地铁车辆等机车车辆上装车，取得了良好的应用效果。

2.5.1 逆变器的工作原理

三相逆变器的基本作用是将直流电转化为交流电，图 2.3-49 所示为三相逆变器原理图。



图 2.3-49 三相逆变器原理图

在这个逆变电路中，由 6 个开关组成了一个三相桥式电路。交替打开和关断这 6 个开关，就可以在输出端得到相位

各相差120°(电气角)的三相交流电源。该电源的频率由开关频率决定,而幅值则等于直流电源的幅值。只要改变各个开关打开和关断的顺序,就可以改变该交流电源的相序,从而改变异步电动机的转向。因为这些开关同时起着改变电流流向的作用,所以它们又称为换流开关或换流器件。

2.5.2 逆变器各部件参数计算及器件选型

三相逆变器原理如图2.3-49所示,主要由6个逆变开关管及其反并联二极管组成。

(1) VT1~VT6。VT1~VT6组成逆变桥,把直流电逆变成频率和电压可调的交流电。这是逆变器的具体执行环节,因而是逆变器的核心部分。

(2) 续流二极管 VD1~VD6。其主要功能为:
1) 电动机的绕组是电感性的,其电流具有无功分量。VD1~VD6为无功电流返回直流电源时提供通道。

2) 当频率下降,电动机处于再生制动状态时,再生电流将通过 VD1~VD6 返回给直流电路。

3) VT1~VT6进行逆变的基本工作过程中,同一桥臂的2个逆变管处于不停交替导通和截止状态,在交替导通和截止的换相过程中,也不时地需要 VD1~VD6 提供通路。

三相逆变器的选择主要是功率元件的选型。以下以“中原之星”逆变器为例,说明逆变器元件的选型。其中间直流环节电压额定值为1500V,一台逆变器带4台牵引电动机,牵引电动机额定电流为120A,最大起动电流为185A。

为了保证IGBT的额定工作参数在器件的安全工作区内,要考虑瞬间过电压、电流的选择与最大工作频率、总的功耗和冷却方式都有关系。实际应用中可按下面提供的计算公式选用元件,确定逆变器开关元件参数。

(1) IGBT 元件电压额定值的确定。设计按式(2.3-74)确定IGBT元件的电压定额,即

$$V_{CESP} = (K_v U_d + V_e) \alpha_1 \tag{2.3-74}$$

式中: K_v 为过电压保护系数(115%); U_d 为直流电压最大值,取1800V; V_e 为分布电感引起的 $L \frac{di}{dt}$ 尖峰电压,一般取 $V_e=700V$; α_1 为安全系数,一般取 $\alpha_1=1.1$; V_{CESP} 为元件关断时峰值电压。

计算出元件关断峰值电压为3047V,宜选取3300V的IGBT功率元件。

(2) IGBT 元件电流额定值的确定。原则上 $I_c \geq I_{\varphi}$, 逆变器的容量和输出线电压、线电流的关系为

$$S = \sqrt{3} V_0 I_0 \tag{2.3-75}$$

$$I_{\varphi} = \sqrt{2} K_g K_t I_0 \tag{2.3-76}$$

式中: S 为逆变器的容量,VA; V_0 为逆变器输出线电压,V; I_0 为逆变器额定输出线电流,A; K_g 为过载系数(150%,1min),一般取 $K_g=1.5$; K_t 为 I_c 随温度变化的降额因子,一般取 $K_t=1.15$ 。

计算出 I_{φ} 为1170A,宜选用1200A的IGBT开关元件。根据以上计算,逆变器选用3300V、1200A的IGBT元件可以满足要求。

2.5.3 逆变器的结构

自20世纪80年代中期以来,在大功率牵引应用领域中,GTO逐步取代较早使用的快速晶闸管,成为一段时期大功率牵引逆变器的唯一器件。直到90年代,由于IGBT器件的发展,IGBT在一些电压较低、功率稍小的主变流器应用场合逐渐取代GTO。特别是进入21世纪,由于3300V/1200A元件的日益推广和其他高压IGBT元件(4500V和

6500V等级)的问世,IGBT牵引逆变器在铁路机车、动车、城市地铁车、轻轨车、磁浮列车等牵引领域全面推广应用。由于IGBT相比GTO具有较高的开关频率、电压驱动、无吸收电路等优点,同时同等功率在体积、质量上具有很大的优势,可以期待不久之后,IGBT和IPM(集成了驱动和保护IGBT)产品将取代GTO。

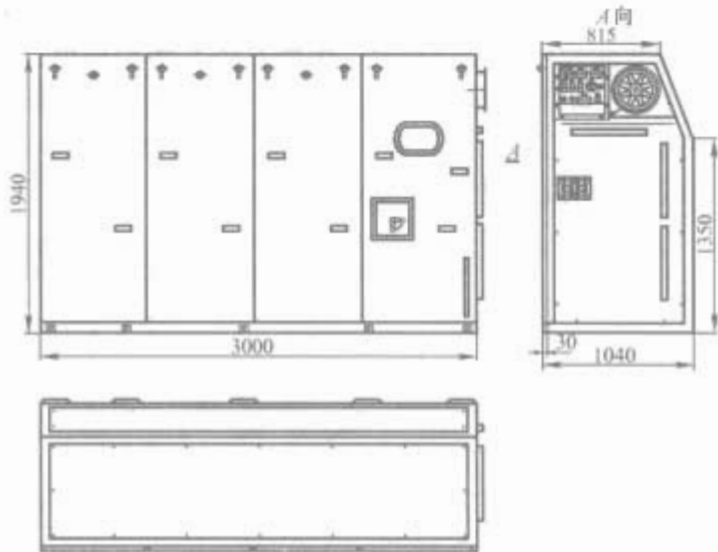


图 2.3-50 GTO 牵引变流器外形图

下面以GTO和IGBT逆变器说明其结构主要特点。

2.5.3.1 电力机车用GTO牵引变流器

对机车牵引变流器而言,这里没有独立的逆变器结构,逆变器仅是牵引变流器的一部分,实际上它与四象限整流器设计构成一个整体,称为牵引变流器。为叙述方便起见,本节以牵引变流器为标题。

图2.3-50所示为用于电力机车电传动系统的一种GTO牵引变流器外形图,其总体尺寸为3000mm×1940mm×1040mm。

该电力机车用GTO牵引变流器是一个典型的交—直—交变流器。电网25kV单相交流电经牵引变压器降压后向GTO牵引变流器输入,主电路包含PWM四象限整流器、中间直流环节、逆变器等部分,其中间直流环节又包括直流支撑电容、二次滤波电路及过电压斩波电路等。

GTO牵引变流器柜在内部结构上分隔为高压区(HVD)和低压区(LVD),如图2.3-51和图2.3-52所示。高压区安装有GTO水冷相构件、线路接触器、充电接触器、电流电压传感器、支撑电容器、二次滤波电容器等高压电气部件;低压区安装有传动控制单元(DCU)、门控电源等低压电气部件。高低压电气部件之间由金属隔板、隔离变压器和屏蔽电缆在结构、电气和电磁场各方面实现隔离。

高压区的前门安装有安全联锁门锁,保证只有在机车停止运行及主电路接地的情况下才能够打开变流器柜高压区的前门。

2.5.3.2 地铁车辆用IGBT牵引逆变器

图2.3-53所示为一种地铁车辆IGBT牵引逆变器的外形图,其总体尺寸为2400mm×870mm×670mm。

电网1500V直流电为IGBT逆变器的输入电源,与电力机车用GTO牵引变流器相比,主电路没有交流变直流PWM四象限整流器部分,它只包含了中间直流环节、逆变器等部分,其中间直流环节又包括直流支撑电容、电阻制动电路等。其结构的主要特点为:

(1) 逆变器的冷却方式朝高效、环保的方向发展。大功率IGBT逆变器随着冷却技术的发展主要有自然冷却、强迫通风冷却、液体冷却等几种。以图2.3-53所示结构为例,逆变器采用铝散热器加强迫风冷的冷却方式,风道位于

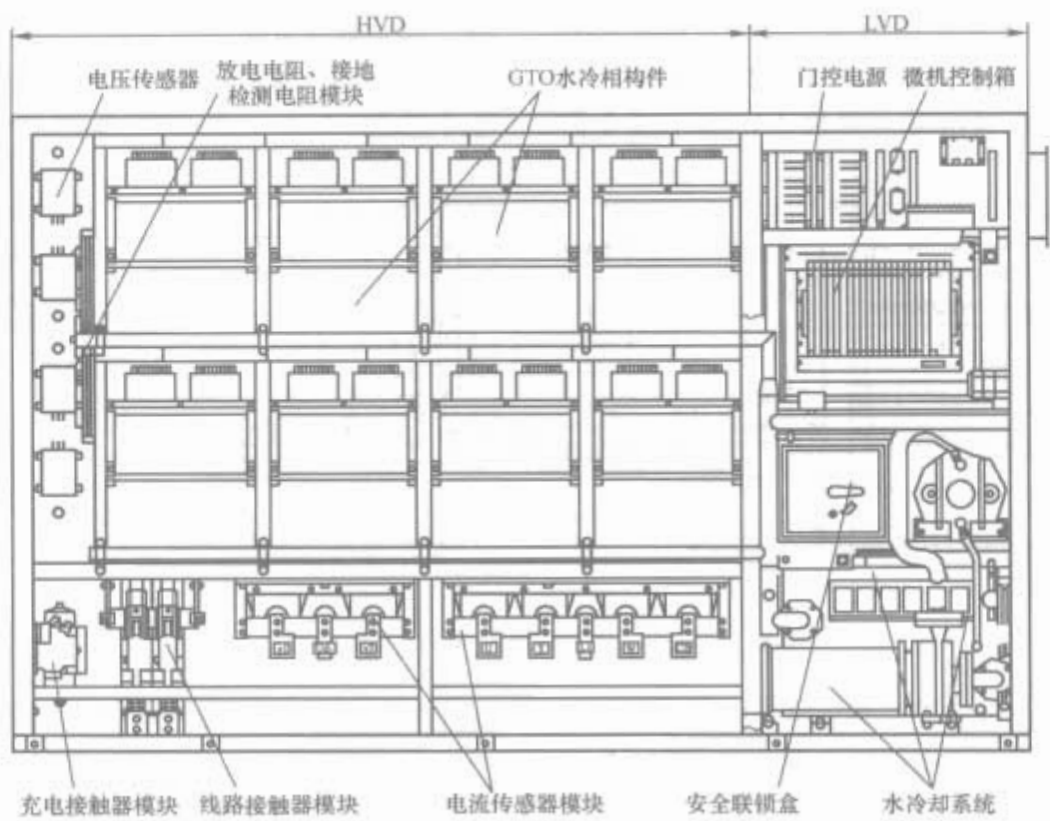


图 2.3-51 GTO 牵引变流器内部结构布置图

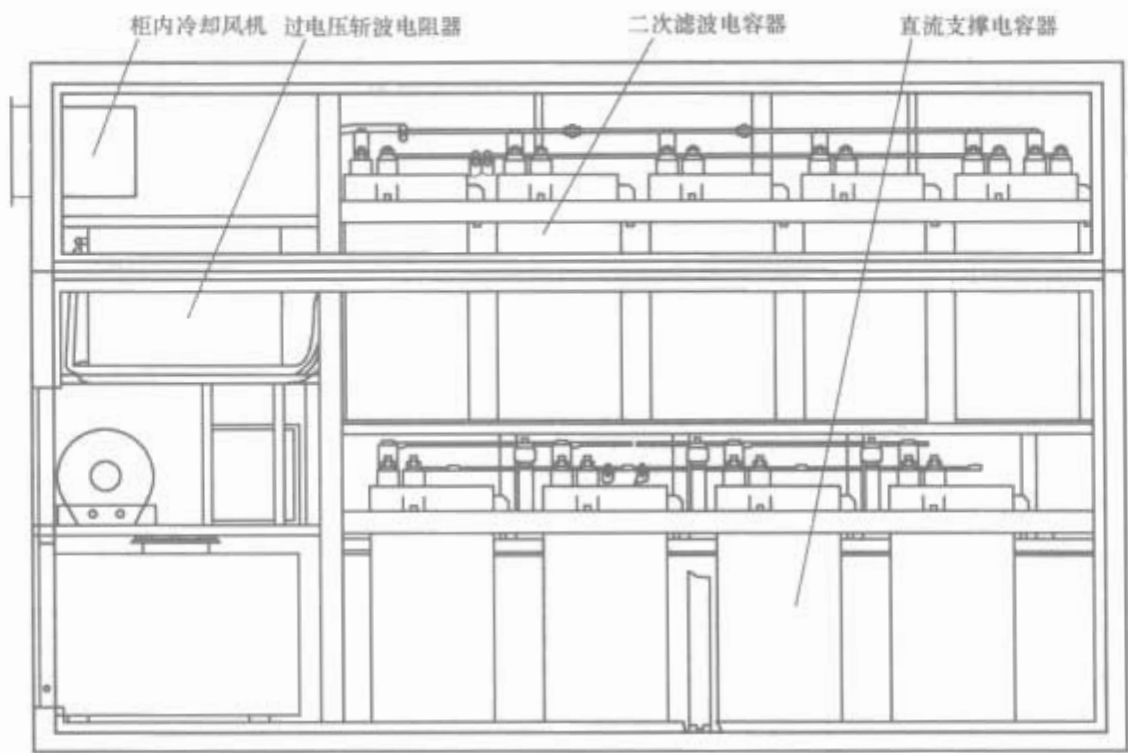


图 2.3-52 GTO 牵引变流器背面结构布置图

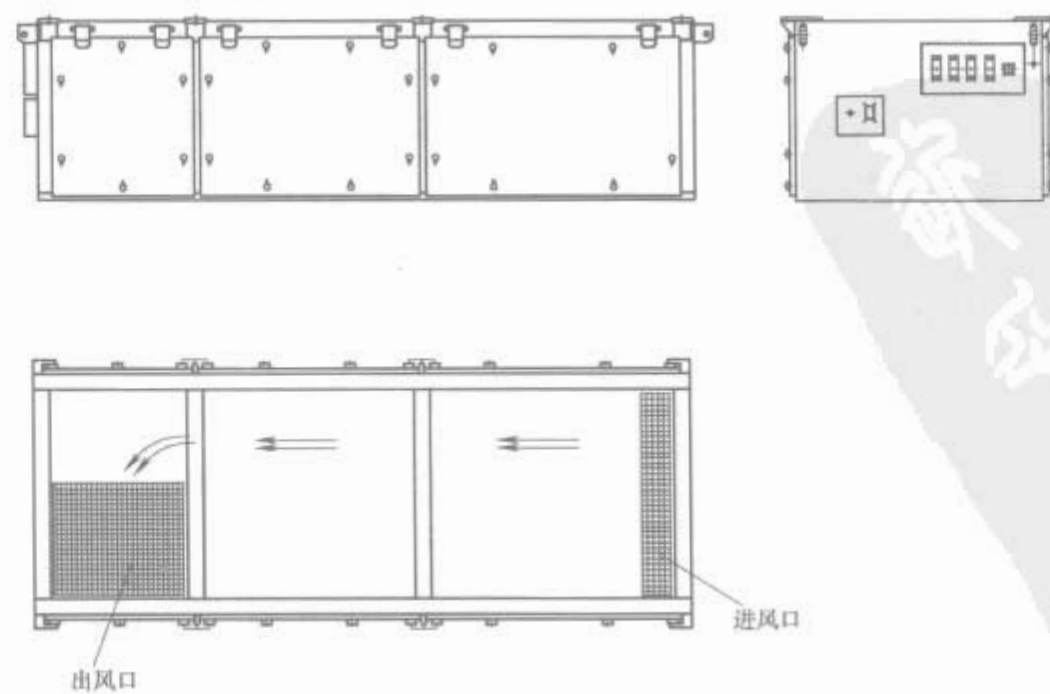


图 2.3-53 IGBT 牵引逆变器结构及通风示意

逆变器的底部，进风口及出风口也位于逆变器底部。

(2) 逆变器采用抽屉式模块化结构，便于逆变器的安装、检修及维护，使逆变器模块结构简单、维护方便，如图 2.3-54 所示。此类逆变器吊装于车底下，整个逆变器

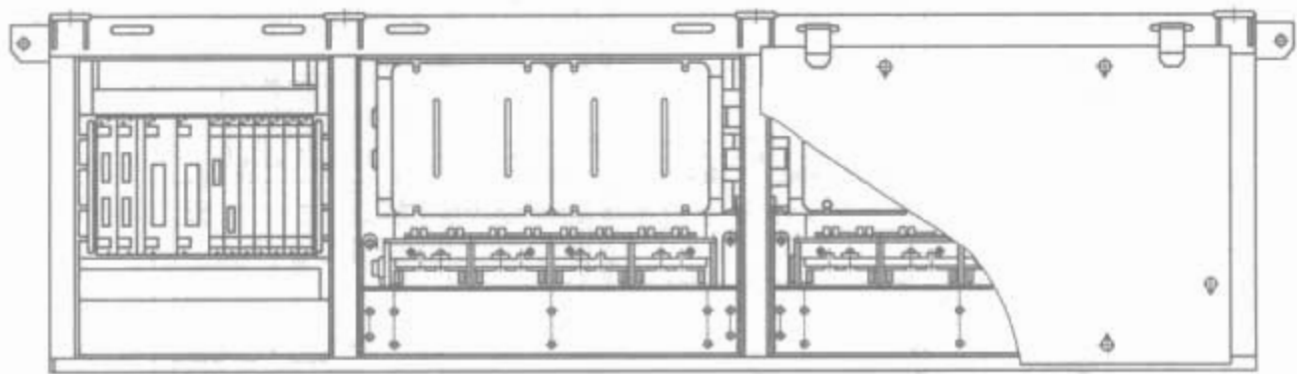


图 2.3-54 IGBT 逆变器结构布置图

(3) 集成度高、无吸收电路、功率回路全部零部件集为一体的模块化结构，有利于减小设备的体积、尺寸。逆变器模块是一个独立单元，它包含了散热器、IGBT 元件、复合低感母排、驱动单元以及温度检测单元、电源等，主电路省去了繁琐复杂的吸收电路，逆变器模块的 IGBT 元件与中间直流环节支撑电容采用了低感复合母线。这样，主电路上的分布电感大大降低，从而在 IGBT 元件关断过程中，由于电路上的电感量而产生的尖峰过电压 Ldi/dt 大大减小，保证了 IGBT 元件运行于其安全工作区。

(4) 逆变器模块通用性好。在逆变器设计中，一般将三相逆变器模块设计成可以适用于四象限整流器的电路和结构形式。

(5) 传输采用光纤传输技术，对外接口抗干扰性强。在大功率 IGBT 元件开关过程中，会产生强大的电磁干扰，逆变器的 PWM 信号采用光纤传输，抗电磁干扰 (EMC) 能力强，传送速率高，传送距离长，可实现各种电压的隔离，从而大大提高了逆变器的可靠性。

2.6 传动控制单元

2.6.1 功能特点与结构形式

传动控制单元 (drive control unit, 简称 DCU) 的核心任务是：根据司机指令完成对四象限变流器的实时控制、逆变器与交流异步牵引电动机的实时控制和黏着控制，同时具备完整的故障保护、故障诊断功能和轻微故障的自恢复功能。

对于不同形式的轨道交通装备，DCU 的功能是不同的，如直流供电的地铁车辆不需要四象限整流控制，磁浮车则无需黏着控制等，其中电力机车或动车组的 DCU 功能最为完整，主要控制功能如下：

- (1) 牵引变流系统的逻辑控制。
- (2) 牵引和制动的特性计算。
- (3) 四象限变流器控制。
- (4) 主变流器脉冲分配控制。
- (5) 交流电动机控制。
- (6) 机车或动车黏着控制。
- (7) 变流系统的保护、故障记录、诊断。
- (8) 与 MVB 接口及通信。

DCU 的控制功能可分为 2 层。上层的控制功能实时性要求不高，主要完成变流系统的逻辑、牵引制动特性控制、通信控制和故障诊断、记录等功能；下层则为实时控制，主

柜由两个相同的逆变器模块和控制箱、冷却系统及传感器、接触器等其他部件组成。维护时仅需松开固定螺栓及母排上的连接螺栓，即可将此逆变器模块像拉抽屉一样从柜中抽出。

要有四象限整流控制、异步电动机控制、黏着利用控制、中间直流环节控制。

DCU 的结构形式主要有机箱集中结构和模块一体化结构。其中，机箱集中结构维护方便，便于协同控制，缺点是控制信号的线路相对较长；模块一体化结构克服了机箱结构的缺点，但是 MVB 节点较多，各模块相对独立，通过 MVB 交换数据较慢。

机箱集中结构形式的功能框图如图 2.3-55 所示，实时控制的四象限变流控制 (LCC) 和逆变器电动机控制 (MCC) 通过 DCU 的内部总线连接上层控制。

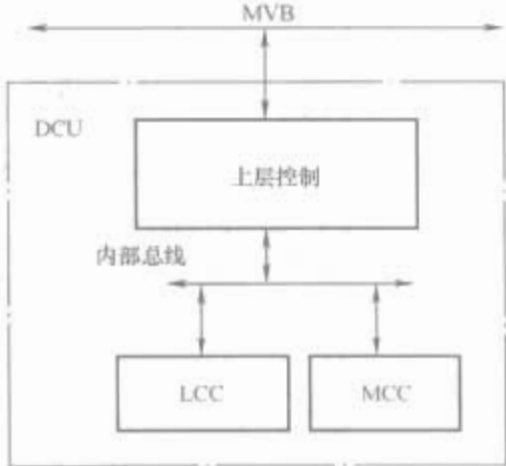


图 2.3-55 DCU 机箱集中结构形式的功能框图

模块一体化分布式结构形式的功能框图如图 2.3-56 所示。I/O 单元完成变流系统的上层控制功能，DCU/L 和 DCU/M 则是分布于变流模块的实时控制单元，分别完成四象限整流控制、逆变器和电动机控制。



图 2.3-56 DCU 模块一体化分布结构形式的功能框图

2.6.2 硬件配置

随着微电子技术的发展，传动控制从模拟控制发展到数字控制。数字控制系统具有精度高、速度快、存储量大和有逻辑判断功能等特点，可以实现高级复杂的控制方法，获得快速精密的控制效果。

控制系统的硬件设计是一个综合运用多学科知识、解决

系统的基础及可靠性问题的过程,涉及的知识面较广,包括交流电动机的控制技术、计算机技术、测试技术、数字电路技术、电力电子技术、功率变换及其驱动技术等,是一个复杂的系统问题。

传动控制系统的硬件一般包括微处理器、接口电路和外围设备等。其中,微处理器是控制系统的核心,通过内部控制程序,对输入接口输入的数据进行处理,完成控制计算等工作;通过输出接口电路向外围设备发出各种控制信号;外围设备主要是检测传感器、执行机构、通信等。微处理器大多采用单片机和数字信号处理器(DSP),采用多总线结构、流水线结构、多处理器结构等;外围使用高速存储器、高速高精度A/D和D/A等,使系统具有很高的性价比。

一个实时性能满足复杂控制算法要求、通用性强、稳定可靠的硬件系统是高性能传动控制系统的基础。

2.6.3 逻辑与通信控制

本节介绍控制装置上实现的变流系统的控制逻辑及与多功能车辆总线的通信,包括:主断路器(LCB)、充电接触器(CC)、线路接触器(SC)的时序控制逻辑、监测、保护与故障处理;交—直—交电力机车的四象限变流器(LC)、逆变器(MC)的时序控制逻辑;司机钥匙、受电弓、方向手柄、牵引/制动手柄的不同状态对主变流器控制的逻辑关系;牵引力的给定时序;过分相逻辑;隔离逻辑。

2.6.3.1 主顺序控制逻辑

主顺序控制逻辑规定了DCU上电后,如何根据CCU通过MVB传输的命令与状态,以及传动系统各部件的状态,合理、可靠、准确地控制并实施保护。上电复位之后,主顺序控制的初始化从系统自检开始执行;初始化完成后,周期性循环执行以下逻辑。

(1) 系统自检。系统上电以后,主变流器控制电路内部各个CPU之间通过固定的数据交换实现握手,确认系统的状态正常,并对外部传感器静态检查;在检查完成之前,DCU发出“故障消除”命令,一段时间以后,停止“故障消除”命令。在上电自检过程中,外部接触器处于无效状态,断开主断路器联锁触点、充电接触器和线路接触器。

握手完成以后,DCU发出闭合充电接触器、线路接触器命令;之后又发出断开充电接触器、线路接触器命令。在发命令之后延时一段时间,检测接触器状态是否与发出的命令相一致,判断接触器正常工作与否。

(2) 系统初始状态设置。握手完成之后,闭合门控电源接触器,起动门控电源。如果有多于一个门控电源,为了减少对电源系统的冲击,需要将多个门控电源分时起动。例如,其中一个门控电源得电并起动后,延时几秒以后另外一个门控电源才得电起动。有些车型的门控电源接触器不受控制电路控制,在上电以后自行通过延时继电器分时起动。

(3) LCB的闭合与分断控制。LCB是连接主电路的控制开关,一般由多个触点控制,如主变流器、辅助变流器、列车网络系统等都可以将其断开。当所有的触点都允许其闭合时,才能使其处于闭合状态,否则只要有任一设备发出断开命令,都将分断LCB。

当DCU接收到来自CCU的“使能”有效、司机钥匙为“合”状态,并且自身没有任何故障的情况下,允许闭合LCB的联锁触点。如果接收到CCU发出断开LCB命令或“使能”信号无效,则先封锁逆变器,然后断开LCB;另外,当主变流器处于工作状态时,发生较为严重的故障,如中间直流环节电压过高,此时也应当即时断开LCB。

(4) CC和SC的控制。机车或动车的中间直流环节接

有支撑电容,起到滤波并稳定中间直流环节电压的作用。正常工作时,首先闭合CC对其充电,当中间直流环节电压达到某一较高值时,再闭合SC,对这两个接触器应该有严格的时序控制,以保证充电电路和支撑电容的安全工作;并且在有故障发生时能按照时序断开接触器,使电容充分放电,确保检修人员的安全和下一轮充电时序的正常进行。

如果收到方向命令,并且判断LCB已经闭合,来自CCU的相关条件均已满足,此时可以闭合CC,对支撑电容进行充电。当充电进行到一定时间,并且中间直流环节电压已达到某一较高值时,可以闭合SC,使中间直流环节贯通。如果在运行途中,发生诸如司机钥匙无效、LCB断开、网压过高或过低、中间直流环节电压过高或过低、CCU的相关条件变化,此时应当立即判断主变流器是否封锁。如果已经封锁,则断开CC和SC。

在有些电力机车的控制逻辑中,在发出闭合SC并且已经确认SC反馈状态为接通时,可以断开CC,使充电电阻脱离主电路。有些车型在SC闭合之后,CC仍然保持闭合状态,如地铁车辆和内燃机车就是采用这种设计。这两种方式目前都有应用的实例。

(5) 对主变流器的启停控制。在交—直—交电力机车中,由四象限变流器控制中间直流环节电压的稳定。在正常的控制逻辑中,当主电路构成以后即SC闭合以后,如果收到方向命令即可起动四象限变流器。在四象限变流器起动大概1s以后,如果收到司机手柄给定值即可起动逆变器。当然,所有的正常逻辑都是假定在没有任何故障的基础上。

当主变流器处于起动状态时,周期性地判断相关逻辑,如LCB状态、SC状态、网压的高低、中间直流环节电压的高低、元件有无故障等。如果有任一妨碍主变流器正常工作的条件发生,逆变器首先以一定斜率减载,在规定的时间内停机,逆变器停机的同时四象限变流器也停机。另外,在机车正常工作过程中,司机主手柄回到零位的时间超过一定时间,逆变器执行正常停机,首先以一定斜率减载,在规定时间内封停,但此时四象限变流器不停机。只有当方向手柄回到零位一段时间后,才封停四象限变流器。

如果方向手柄回到零位不超过规定时间,又回到方向指令有效的位置时(如向前或向后),四象限变流器保持原工作状态。

2.6.3.2 状态控制

状态控制对DCU的过程控制起着至关重要的作用,周期性或实时地改变主变流器的运行模式。逻辑控制电路以固定的时间间隔从CCU、数字量输入、模拟量输入传输来的信号采样,并将信号综合判断,以控制主电路中各个接触器,并使主变流器处于合适的状态。

当确认由CCU传输的司机钥匙状态为断开位或升弓命令为无效时,LCB立即跳开,同时封停四象限变流器和逆变器脉冲,并且禁止其再次投入工作。封锁脉冲以后,断开CC和SC。

DCU所得到的诸如方向、司机手柄给定值以及过分相等命令或状态都来自于网络传输。方向命令在行车过程中至关重要,在速度高于一定值(如5km/h)时方向指令的改变无效,保持原方向,即所谓的换向保护。正常的换向应当是在速度为零的前提下,方向手柄从向前转到向后位或者相反。

当方向手柄从有效位(向前/向后)回到零位超过一定时间(如1s),此时认为是正常停车,逻辑控制电路将控制逆变器以一定速率减载,减到一定值时,封停主变流器,并

断开充电电路，等待下一次操作。

同样地，当牵引/制动手柄停留在零位一段时间，逻辑控制电路将控制逆变器以一定速率减载，减到一定值时，封停主变流器。如果此时方向手柄仍然处于有效位，则不断开充电电路，此时整个主电路处于构成状态，只要司机给出牵引指令，就可以起动逆变器，不需要充电过程。

主变流器处于工作状态时，如果接收到 CCU 命令本单元断开 LCB 的指令，则执行立即封锁主变流器脉冲，并且禁止主变流器重新投入工作，之后断开 LCB 和 SC。

如果动车组包含 2 个或 2 个以上的牵引单元，那么就具有单元隔离的功能。当某一个牵引单元出现故障时，将故障的种类和严重程度上报给 CCU，由司机决定是否隔离此单元。为了不影响另外的牵引单元工作，可以将故障的单元隔离，即此单元不参与牵引/制动控制，同时放弃对车辆共有部分如 LCB 的控制。当接收到由网络传输的单元隔离命令时，逻辑控制电路立即封锁四象限变流器和逆变器脉冲，并且禁止该单元重新投入工作，之后断开 SC，并向 CCU 报告“本单元隔离”。

当故障消除后，可以重新将先前隔离的单元投入使用，此时仍然需要司机的干预，撤消隔离命令。当 DCU 接收到网络传输的单元恢复命令时，逻辑控制电路清除以前累计的故障次数，并取消相关单元的隔离，按正常起动的逻辑时序，将该单元重新投入使用。

2.6.3.3 转矩给定

在机车运行途中，由 CCU 得到司机手柄给定，通过 MVB 传输到 DCU，逻辑控制电路由外包络保护线及网络传递的力二者求小，并加上斜率的限制得到给定转矩。例如，上升率设为 1.2s，从 0 上升到最大转矩；下降率为 1.5s，从最大转矩下降到 0。

MCC 起动以后，转矩从 0 开始以速率变化率上升到目标值，见图 2.3-57。

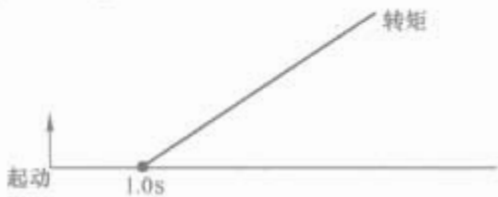


图 2.3-57 转矩给定

根据司机手柄给定按图 2.3-58 的控制，即恒转矩加速到包络线，然后按照包络线计算给定力。

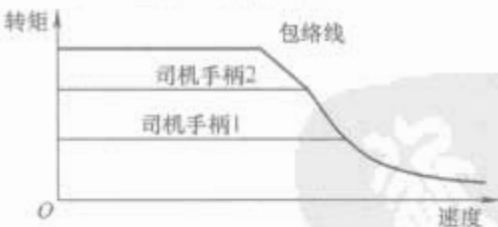


图 2.3-58 转矩级位控制

2.6.3.4 DCU 内部以及与 CCU 的通信

DCU 内部各电路板之间利用并行总线格式进行数据交换。例如，LC 控制器、MC 控制器与主控制板之间通过双端口 RAM (DPRAM) 进行数据交换，再采用特定的数据交换协议，能实现可靠、快速的数据通信。

与 CCU 采用 MVB 传输，通过通信板将主控制板的数据转换成符合 MVB 协议格式的数据包，通过光纤传输到 CCU 上去；同样地，由光纤传输的从 CCU 来的数据，经过通信板转换成主控制板可以识别的数据样式，即实现了 DCU 与 CCU 的通信，见图 2.3-59。

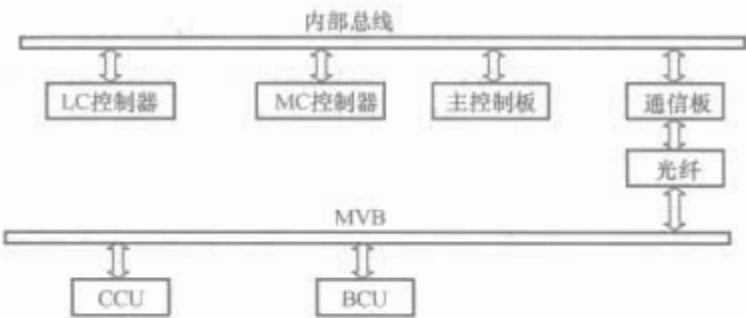


图 2.3-59 DCU 内部与 CCU 通信

有关 MVB 通信的细则，请见第 5 节“控制与网络”。

2.6.4 故障保护、诊断与记录

一般的机车控制装置都有相应的故障保护及记录功能，实现的方式也多种多样，通过实现故障记录，可以改善控制装置的性能，并大大方便了调试过程，使产品更加人性化。本节介绍传动控制单元上实现的主变流器控制系统的故障保护、故障记录与诊断等功能。

2.6.4.1 状态监测与保护

状态检测与保护功能伴随 DCU 控制过程，实时或周期性地完成。在控制过程中对故障实行等级分类，轻微故障设为“自恢复故障”，中等故障设为“可复位故障”，严重故障设为“不可复位故障”。在状态检测过程中，发现“自恢复故障”，则在条件满足时自动进行“故障消除”；发现“可复位故障”，则可接受 CCU 的“故障消除”命令，故障消除后重新工作；若为“不可复位故障”，则永久停机，直到上电复位才能清除此故障。

状态检测与保护的主要内容包括：LCB、CC、SC 的时序控制逻辑、监测、保护与故障处理；LC、MC 的时序控制逻辑；水冷主变流器中的水压测量、报警、保护与对传感器的监测；水压开关参与保护；主变流器进口水温和出口水温的测量、报警、保护与对传感器的监测；水电导率测量、报警、保护与对传感器的监测；电动机温度测量、报警、保护与对传感器的监测；门控电源的状态监测等。故障保护在传动控制单元中，可分为硬件和软件两种保护。

(1) 硬件保护。硬件保护是要求最严格的系统保护，保护动作及时准确。它包括电动机过电流，直流过电压，插件出位，接地报警，电源故障，门控电源故障，四象限变流器一重过电流故障、二重过电流故障、直流过电压。除报警外，一旦发生故障，立即将故障锁定；当接收到解锁信号时，硬件才清除锁定的故障，机箱中的单板机电路板通过总线循环读取故障信息，根据故障性质和司机台“故障消除”指令进行处理。

(2) 软件保护。DCU 在上电复位之后，会对本单元内的 CPU 进行自检，包括：机箱内各个 CPU 之间的握手、数据校验；对 CC、SC 等接触器，发出分断和闭合命令并检测其反馈状态是否与命令一致；通过 D/A 通道模拟传感器信号并进入测试系统；测试系统采样模拟信号与输出值相比较，判断是否符合。其自检阶段发现有任何故障都将断开 LCB、CC 和 SC，并禁止四象限变流器、逆变器投入工作，同时向 CCU 报告故障类型。

在机车运行过程中，DCU 持续地执行相关故障检测和保护，一旦有故障发生，按照相应的故障处理措施进行响应。

在上电自检和机车正常工作过程中，都会操作接触器。DCU 不仅输出对接触器的控制命令，并且实时检测该接触器的反馈状态，当主电路中 CC 或 SC 的闭合或断开命令发出后，在适当的延时时间之后检测到接触器的反馈状态与发

出的命令不一致,则认为接触器故障。如果发出的命令是分断,而反馈的状态是闭合,则认为接触器分断故障;反之,如果发出的命令是闭合,而反馈的状态是分断,则认为接触器闭合故障。此时应当立即封锁逆变器,并且禁止其再次投入工作;断开 LCB,向 CCU 报告接触器充电卡分或卡合故障。

在部分车型中,DCU 还对门控电源的起动进行控制,同时检测门控电源的故障。如果在起动门控电源后一段时间内检测到门控电源的任何一路没有输入电源(低电平),则认为门控电源故障。一般门控电源故障认为是不可恢复性故障,此时必须封锁逆变器,并且禁止其再次投入工作,并断开主断路器,向 CCU 报告“门控电源故障”。门控电源的故障检测一定要在起动门控电源一定时间之后(如 7s)再进行判断。

对于开关元件,如 GTO,其故障判断是由控制机箱通过所发出的命令与开关自身反馈的状态相比较,以判定元件是否正常工作,或是处于故障状态。IGBT 型开关元件,其故障判断在模块内部的脉冲分配级,由模块本身将故障判断结果传送给控制机箱,再实施保护。当开关元件发生故障时,立即断开 LCB,并且封锁四象限变流器和逆变器的脉冲,向 CCU 报告故障类型,开通快速放电,释放中间直流环节电能。

在运行途中,DCU 对网压和中间直流环节电压进行周期性采样监测,在连续的时间内检测到网压或中间直流环节电压低于某一门槛值,并且不是处于无电区,则认为网压或中间直流环节电压过低,此时 DCU 以一定斜率卸载,减载到一定程度以后封锁逆变器,并向 CCU 报告故障类型。此类故障为可恢复性故障。当网压或中间直流环节电压恢复到一定值时,并且其他外部条件没有变化,应按正常程序重新启动逆变器。

在交一直一交电力机车中,如果四象限变流器起动之后,检测到中间直流环节电压高于某一门槛值,则认为中间直流环节电压过高;在交一直机车中,如果闭合 SC 一定时间之后,检测到直流电压高于某一门槛值,则认为直流电压过高;在直一交机车或动车传动系统中,在闭合 LCB 一定时间之后,检测到网压持续高于某一门槛值,或闭合 SC 以后,检测到直流电压持续高于某一门槛值,则认为网压或直流电压过高。此时立即断开 LCB,并且封锁四象限变流器和逆变器,并向 CCU 报告故障类型。此类故障属于不可恢复性故障,一旦发生,应将故障锁存。即使直流电压回落到正常值,故障依然保留,只有通过故障复位命令才能消除故障。

在闭合 CC 以后,即充电回路已经构成,如果在一定时间内中间直流环节电压达不到预定值,则认为充电回路存在故障。例如,在直一交机车中,闭合 CC 几秒以后,如果检测到直流输入电压仍低于网压的 85%,则判定为充电电路故障。此类故障一般是充电环节的某个器件出现损伤,如充电电阻或中间支撑电容,属于不可恢复性故障,应当立即断开 LCB,封锁四象限变流器和逆变器,并向 CCU 报告“充电超时”故障。

逆变器起动以后,在电动机侧应当有电流输出,在控制系统检测到三相电流有任一相瞬时值超过一定值(门槛值),应判断为电动机过载,立即封锁逆变器,并向 CCU 报告故障类型。电动机过载属于可恢复性故障,故障发生以后,如果接收到来自外部或控制系统自动的故障复位命令,则允许将此故障清除,同时将故障次数记录在存储器中;如果电动机过载故障发生的次数和频度增加到一定程度,则将故障升

级为不可恢复性故障,此时外部的故障复位命令对于故障清除不再起作用,只有硬件复位或重新上电才能清除故障。

主电路接地的判断一般来说有两种方式:一是利用全中间直流环节电压与半中间直流环节电压的比较,如果二者的差值大于一定值或小于一定值,则认为主电路在某点接地;二是利用主电路流入电流与流出电流相比较,如果二者的差值大于门槛值,则认为主电路接地。接地故障作为不可恢复性故障处理,要求立即断开 LCB,并且禁止主变流器投入运行,直至硬件复位或重新上电将故障清除为止。

DCU 上电以后,在 DCU 内部各个 CPU 之间,如在逆变器控制器与时序逻辑控制器之间、四象限变流器控制器与时序逻辑控制器之间、DCU 与 CCU 之间都会不间断地检测对方送来的生命信号(不断变化的数字量)。如果有任何一方检测到对方的生命信号中断,则认为通信中断。通信中断属于自恢复性故障,只要故障特征消失,此故障就自行清除,主变流器即可按照正常流程投入运行。

2.6.4.2 故障状态的记录与诊断

很多车型都对发生的故障有记录,并且在恰当的时候将记录转储,以便于进行针对故障的分析和诊断。记录的数据大致分为两种:一是记录故障日志,即对故障发生的类型、时间、工况、速度等状态信息进行记录;二是记录波形数据,即在故障发生前后的一段时间,对相关电气参数(如中间直流环节电压、输出电流、手柄级位等)的采样数据进行记录。

例如,在 DCU 中记录故障发生前后信息的主变流器的跟踪存储数据,存储在 DCU 机箱中的相关存储介质里。此介质可以是任何一种可以失电保持的存储器件,如 FLASH、CF CARD 或带有电池的静态 RAM 等。

车辆处于非运营状态时,可以通过手动操作,决定将某些或全部的记录故障转储。转储的方式也可以多样化,DCU 把跟踪监控的数据打包,以特有的格式向 CCU 传送,通过光纤传输到存储插件中存储,然后再用 PC 机分析其波形。也可以直接利用 DCU 的 USB 或串行接口,将数据转移到 PC 机,通过地面的专家诊断软件进行分析。

在车辆处于检修状态时,可以由司机操作置在实验位,在此工况下,可以进行逻辑测试、接触器检测以及故障模拟。在实验位,LCB 处于断开位置,传感器的输入信号断开,由 DCU 中某一 CPU 模拟输出传感器信号,此时的 DCU 可以正常地充电短接,再由 DCU 本身进行 A/D 转换,与模拟的输出进行比较,以测试整个输入输出通道。当模拟输出值上升到保护门槛值时,DCU 应该进行正常的保护,并将故障记录在相应的存储设备中。这样就可以测试整个电路是否正常,DCU 所有的通道是否良好,故障保护以及记录是否可靠。

2.6.5 四象限变流器的控制

2.6.5.1 四象限变流器的控制方法及特点

在四象限变流器的控制方式中主要有直接电流控制和间接电流控制。间接电流控制又称幅相控制,它通过调节四象限变流器交流侧电压的幅值和相位达到控制输入电流的目的。它的控制结构简单,开关机理清晰,但在暂态过程中,交流电流中会出现直流偏移问题。该偏移量的大小和衰减速度同交流侧电阻有关,其电流控制的依据是四象限变流器的空间矢量图。间接控制的静态特性较好,但间接电流控制基于稳态的观点;而系统的过渡过程是由系统的自然特性决定的,四象限变流器的自然特性一般较差,因而间接电流控制的动态性能较差,会造成较大的电流超调,系统的稳定性和

动态响应差。瞬态电流控制是改进间接电流控制动态响应的有效途径,当负载功率变化时,它能快速调节输入电流,并具有较好的动静态特性。

采用输入电流反馈的控制方式可归结为直接电流控制方式,它具有电流波形好,动态响应快等优点,它又包括滞环电流控制和固定开关频率电流控制。滞环电流控制结构简单,实现容易,但存在开关频率不固定的缺点。固定开关频率电流控制克服了滞环电流控制的缺点,这种控制方法的动态性能较好,且开关频率固定,能减少开关器件的损耗和噪声,但存在电流跟踪误差较大的缺点。

2.6.5.2 四象限变流器的控制原理

图 2.3-60 所示为四象限变流器交流电源侧等效电路,其中 L_N 和 R_N 分别为折合到牵引变压器二次绕组的漏感和电阻, \dot{U}_N 为牵引变压器二次电压相量, \dot{I}_N 为牵引变压器二次电流的基波相量, \dot{U}_S 为调制电压的基波相量,可得到二次交流回路的相量电压方程式为

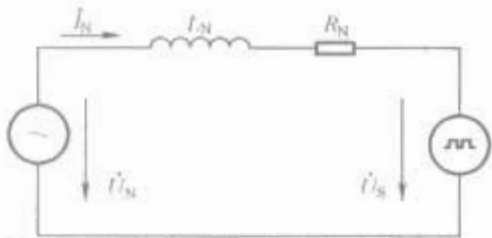


图 2.3-60 四象限变流器交流电源侧等效电路

$$\dot{U}_N = \dot{U}_S + \dot{I}_N R_N + j\omega L_N \dot{I}_N \tag{2.3-77}$$

假设 \dot{U}_N 和 \dot{U}_S 的相角为 φ , \dot{U}_N 和 \dot{I}_N 的相角为 θ , 则用该方程表示牵引工况的相量图如图 2.3-61 (a) 所示。同样,对于再生制动工况,该工况下的相量图如图 2.3-61 (b) 所示。

由式 (2.3-77) 和相量图 2.3-61 可知:如果牵引变压器二次侧电压 \dot{U}_N 和电感 L_N 为已知量,那么只要控制了 \dot{U}_S 的幅值和相位,也就控制了 \dot{I}_N 的幅值和相位;反之,只要控制了 \dot{I}_N 的幅值和相位,也就控制了 \dot{U}_S 的幅值和相位。因此式 (2.3-77) 是实现四象限变流器控制的基本公式。

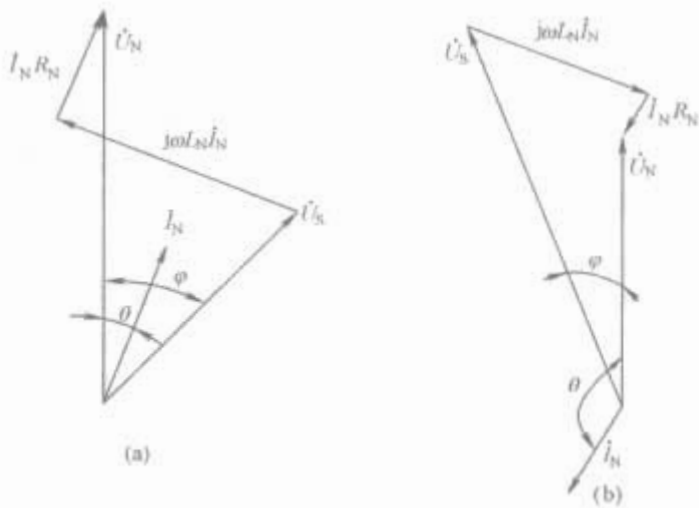


图 2.3-61 四象限变流器控制相量图
(a) 牵引工况; (b) 再生制动工况

根据四象限变流器控制的基本原理,采用图 2.3-62 所示的瞬态电流控制方案,对四象限变流器进行控制,其公式如下

$$I_{N1}^* = K_P (U_{dg}^* - U_d) + 1/T_i \int (U_{dg}^* - U_d) dt \tag{2.3-78}$$

$$I_{N2}^* = I_d U_d / U_N \tag{2.3-79}$$

$$I_N^* = I_{N1}^* + I_{N2}^* \tag{2.3-80}$$

$$U_S^*(t) = U_N(t) - (I_N^* R_N \sin\omega t + I_N^* \omega L_N \cos\omega t) - K[I_N^* \sin\omega t - I_N(t)] \tag{2.3-81}$$

式中: K_P 和 T_i 为 PI 调节器的参数; K 为比例放大系数; I_d 、 U_d 分别为中间直流环节电流和中间直流环节电压; $U_N(t)$ 、 U_N 分别为牵引变压器二次侧电压瞬时值和二次侧电压有效值; U_{dg}^* 为中间直流环节电压的给定值; $i_N(t)$ 为牵引变压器二次侧电流瞬时值。

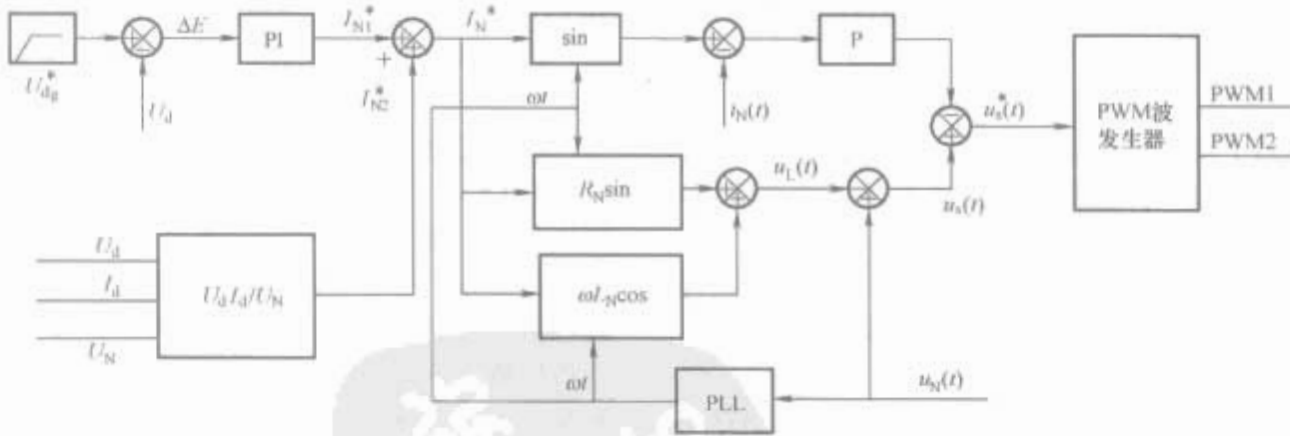


图 2.3-62 瞬态电流控制方案原理框图

上述瞬态电流控制方案的工作原理如下:中间直流环节电压的给定值 U_{dg}^* 和反馈的实际中间直流环节电压 U_d 进行比较,当 $U_{dg}^* = U_d$ 时,误差 $\Delta E = 0$,PI 调节器将保持恒定的输出,这意味着四象限变流器直流侧和交流侧功率平衡;当 $U_d < U_{dg}^*$ 时, $\Delta E > 0$, I_{N1}^* 将增加,因此,四象限变流器输入电流要增加,即输出更大的功率。所以,PI 调节器的输出 I_{N1}^* 反映了所要求的功率的变化。为了减轻中间直流环节电压 PI 调节器的负荷,改善 PI 调节器的动态响应,用中间直流环节的电流 I_d 来计算给定电流的有效分量 I_{N2}^* ,它和 I_{N1}^* 相加共同作为交流电流的给定值 I_N^* 。

在式 (2.3-81) 中,前 2 项表示了四象限变流器正常工

作时相量图的稳态电压关系,第 3 项表示牵引变压器二次侧绕组电流偏差所带来的感应电压,用于对 $U_S(t)$ 进行修正,从而获得参考电压信号即调制信号 $U_S^*(t)$ 。还要考虑相角环调节和磁化电流环调节作为电流的辅助调节及消除牵引变压器直流磁化所带来的影响。

另外,还应考虑牵引变压器牵引绕组间的互感对四象限变流器带来的影响。如果牵引绕组间存在互感,则主变流器输入端不再是独立的回路,而是相互影响的,影响的程度由互感大小和实际工况决定。互感越大,牵引绕组的波动范围和谐波含量也越大;若牵引绕组间的互感值小于各绕组漏感值的 10%,互感的影响可忽略不计。

2.6.6 中间直流环节的控制

中间直流环节的控制主要是指对斩波元件的控制或过电压触发晶闸管的控制。过电压触发控制一般是中间直流环节过电压时，开通晶闸管向中间直流环节放电。对于有四象限变流器控制的电力机车或动车组，这部分斩波控制称为过电压斩波；而对于内燃机车和地铁车辆，则称为制动斩波。这是因为有四象限变流器时制动能量可以回送电网，斩波只是用于抑制中间直流环节电压的瞬间过电压（如机车因空转减载，牵引力突然降低，四象限变流器来不及调节，中间直流环节电压迅速上升），斩波电阻容量小，需限制开通时间。而没有四象限变流器时，则制动能量需通过斩波电阻消耗，电阻容量大。

斩波是根据中间直流环节电压发出斩波脉冲，控制斩波支路来完成的。发出脉冲的方式为砰—砰控制，即电压超过某一值开通，低于某一值关断，也可以用定频调宽的方式。

2.6.7 逆变器控制

2.6.7.1 异步牵引电动机控制

异步牵引电动机作为机车牵引电动机使用，具有天然的优越性：

1) 异步牵引电动机具有体积小、质量小、功率大的特点。体积小，解决了安装空间的限制问题；质量小，减小了机车转向架的簧下质量，改善了轮轨作用力，适应了高速的需要；功率大，解决了高速所必需的动力问题。

2) 异步牵引电动机保持恒定大功率的速度范围宽，有利于实现客货通用型机车。

3) 异步牵引电动机无换向器，消除了电刷与换向器的磨损，提高了机车的可靠性，也降低了机车制造和维修成本。

4) 异步牵引电动机具有优异的牵引性能，它陡峭的自然特性有利于提高黏着利用，能更好地发挥牵引力。

在轨道电力牵引领域的技术探索中，逐步确立了应用电压源逆变器加笼型异步牵引电动机的交流传动技术为主流。交流传动技术自从应用于电力牵引领域，就产生了巨大的影响：优越的运行性能，显著的节能效果，解决了对信号和通信设备的干扰，运营成本低，良好的可靠性和维护性。交流传动技术是实现现代重载和高速电力牵引的基础。

大功率电力牵引交流传动系统的特点要求异步牵引电动机单轴功率大，逆变器开关频率低（通常 GTO 为 270Hz 左右，IGBT 为 450Hz 左右），调速范围宽，不仅在起动恒磁通区发挥很大的转矩，而且在恒功区能长期稳定运行，对转矩控制的动态性能、系统可靠性要求非常高。

20 世纪 70 年代，采用变压变频（VVVF）控制的快速晶闸管逆变器驱动的异步牵引电动机开始应用于电力牵引领域，充分地体现出交流传动的优越性。VVVF 控制是一种简单的异步牵引电动机开环控制方法，改变逆变器输出频率的同时保持输出电压幅值和频率的比值恒定，达到变频调速的目的。

随着技术的进步，最初阶段的 VVVF 控制已经不能满足电力牵引中的一些特殊动态条件变化，诸如受电弓跳弓，车轮的空转/滑行的负载突变等。新的转差频率电流控制取代了最初的 VVVF 控制。电力机车的单轴功率不断增大，现代重载和高速列车对异步牵引电动机转矩动态控制性能的要求进一步提高。基于异步牵引电动机稳态模型的瞬态控制方法得到飞速发展，出现了诸如转子磁场定向控制、直接自控制、直接转矩控制、定子磁场定向控制等

新的控制方法。

微电子、信息技术等为交流传动技术进步提供了现代控制手段。从过去复杂的模拟—数字电路实现简单的控制功能，进入现代网络化控制，小型化、模块化结构。微计算机和微处理器品质不断提升，由 8 位提升到 32 位、64 位，由定点运算提升到浮点运算，处理能力大幅提升，构筑了以高速数字信号处理器为核心的实时控制器。

(1) 异步牵引电动机等效电路模型。异步牵引电动机 T 型等效电路原理如图 2.3-63 所示。异步牵引电动机的空间矢量数学模型为

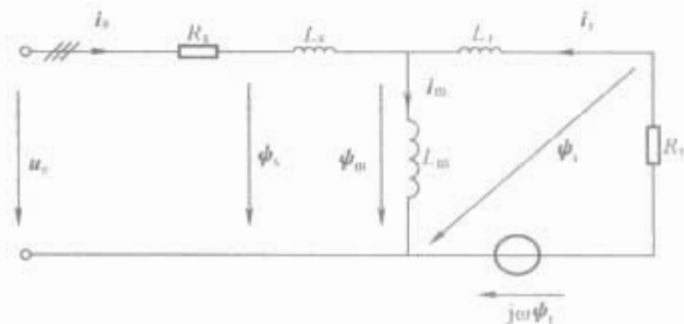


图 2.3-63 异步牵引电动机 T 型等效电路原理
 R_s —异步牵引电动机的定子电阻； R_r —转子电阻； L_s —定子电感； L_r —转子电感； L_m —一定转子互感

1) 电压方程

$$\left. \begin{aligned} u_s &= R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + L_m \frac{di_r}{dt} \\ u_r &= R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\phi\omega_r \\ &= R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} + L_m \frac{di_s}{dt} - j(L_r i_r + L_m i_s)\omega_r \end{aligned} \right\} \quad (2.3-82)$$

2) 磁链方程

$$\left. \begin{aligned} \psi_s &= L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r &= L_r i_r + L_m i_s \end{aligned} \right\} \quad (2.3-83)$$

3) 转矩方程

$$T = \frac{3n_p}{2} L_m \text{Im}[i_s \times (i_r)^*] \quad (2.3-84)$$

4) 运动方程。一般的情况下，电力拖动系统的运动方程如下

$$T = T_L + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.3-85)$$

式中： i_s 、 i_r 分别为定子、转子电流空间矢量； u_s 、 u_r 分别为定子、转子电压空间矢量； ψ_s 、 ψ_r 分别为定子、转子磁链空间矢量； T 为电动机电磁转矩； T_L 为负载转矩； J 为电动机的转动惯量； n_p 为电动机的极对数； ω_r 为电动机转子的电气角速度； Im 为复数的虚部； $(\)^*$ 为复数的共扼。

(2) 转差频率—电流控制。转差频率—电流控制（见图 2.3-64）是在稳态条件下建立定子电流幅值、转差频率与电动机转速、转矩的数学关系。由转差频率和电动机转速计算出定子频率，并根据电压与频率的线性关系得到电动机端电压；同时通过电流闭环控制，补偿电动机端电压。转差频率—电流控制对转矩动态变化的时间通常不能大于 4~5 个转子时间常数。

了特殊的设计,但由于速度传感器与牵引电动机成为一体,导致其工作温升超过 100℃,并且由于路轨的不平承受很强的机械应力。所以,速度传感器在机车或动车运行时的故障率一直较高,经常出现传动轴折断、二通道相位差超限、机车或动车启动未行驶时有误脉冲、行驶时有漏脉冲等故障。

采用无速度传感器控制主要的优点如下:

- a. 减小了牵引电动机的体积。通常速度传感器的厚度大约在 40mm,牵引电动机的定子大约在 200mm,去掉速度传感器后,同样尺寸的牵引电动机转矩可以提高 20%。所以,没有速度传感器的牵引电动机体积可以进一步减小。
- b. 大大提高了 DCU 的系统可靠性。去掉速度传感器以后,可以避免因为速度传感器的机械故障导致的系统故障。
- c. 节约成本。不仅省掉了速度传感器的费用,同时省掉了许多连接电缆的费用,这笔费用在动力分散的电动车组、地铁车辆、轻轨车中尤为可观。在提高系统可靠性的同时相应地减少了生命周期费用。

3) 逆变器死区补偿技术。逆变器的死区时间和开关元件压降引起计算电压和实际电压的差异,进而造成电动机模型电流和实际电流的差异,降低了转速估计的精度,引起转矩脉动,也会引发逆变器过电流。逆变器死区的存在必然使逆变器的输出电压波形产生失真,谐波含量增高。研究人员对此作了大量的工作,取得了很好的效果。按实际需要采样的电气量来分,可以分为电流反馈法、电压反馈法。

4) 先进控制理论在异步牵引电动机控制中的应用。在无速度传感器控制转速估计、异步牵引电动机参数的在线辨识中,新的现代先进控制理论起到很关键的作用。全阶状态观测器自适应方法、模型参考自适应方法、基于最小方差意义上的最优预测估计的卡尔曼滤波法、滑模变结构控制法、人工神经网络控制法等新的控制理论在异步牵引电动机控制中的应用大大促进了交流传动技术的发展。

(8) 我国电力牵引异步牵引电动机控制现状和发展。我国大功率电力牵引的控制技术取得了根本性的突破,已经掌握了交流传动控制中先进的转矩控制方式——直接转矩控制,并成功地运用于干线交流传动电力机车、动车组,如“中华之星”、“奥星”、“中原之星”、出口哈萨克斯坦交流传动机车、北京地铁电动车组、国防科技大学磁浮列车。

我国电力牵引交流传动异步牵引电动机控制技术接近国际先进水平,现正在进一步完善控制系统性能,以获得更优异的转矩控制性能,减小谐波含量和尖峰电流,提高系统的稳定性。借助先进、可靠的仿真技术,建立了交流传动仿真或半实物仿真系统,形成标准的系统设计平台;提升关键部件开发、系统研究与集成能力,构建完整、先进、成熟、可靠的交流传动技术和产品平台。

2.6.7.2 同步电动机控制

同步电动机历来是以转速和电源频率严格保持同步而著称。采用电力电子变频装置实现电压频率协调控制,改变了同步电动机恒速运行不能调速的面貌,使它与异步电动机一样成为调速电动机大家庭的一员。

从控制方式上可将同步电动机变频调速分成他控式变频调速和自控式变频调速两种。他控式同步电动机变频调速系统一般为开环控制系统,不能用在性能要求高的调速场合;自控式同步电动机变频调速系统是电源频率自动跟踪转子位置的闭环系统,目前自控式变频调速主要采用矢量控制方法。

随着电力电子技术的发展和永磁材料成本的降低,永磁同步电动机也引起了从事轨道交通牵引系统开发者的重视。

(1) 同步电动机自控式变频调速。当同步电动机运行于 t_0 时刻,转子位置检测器检测出转子的空间位置角为 λ ,如图 2.3-69 所示,其中定子磁动势夹角为 θ 。

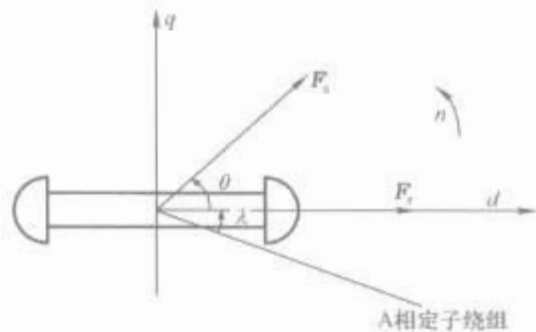


图 2.3-69 同步电动机的空间矢量简图

此时电动机定子三相绕组通入如下电流

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \cos(\lambda + \theta) \\ i_B &= I_m \cos(\lambda + \theta - 120^\circ) \\ i_C &= I_m \cos(\lambda + \theta - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2.3-88)$$

同步电动机产生的转矩为

$$T_e = C_m F_s F_r \sin \theta \quad (2.3-89)$$

式中: C_m 为比例常数; F_s 为定子的磁动势; F_r 为转子的磁动势。

当电动机从 t_0 时刻转动到 t_1 时刻, d 轴与 A 相轴线的夹角将变为 $\lambda' = \omega \Delta t + \lambda$, 其中 $\Delta t = t_1 - t_0$ 。如果定子电流继续保持式 (2.3-88) 所示,则定子磁动势也保持不变。由于电动机的转动,定、转子磁动势之间的夹角 θ 将减小。由式 (2.3-89) 可知,电动机的输出转矩将下降。为了保证电动机的正常运行,必须在转子转动的同时,改变同步电动机定子三相电流的频率,使定子磁动势跟随转子同步旋转,保持 θ 角基本不变,进而保证电磁转矩恒定。因此,电动机运行过程中定子电流随转子转动应变为

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \cos(\omega t + \lambda_0 + \theta) \\ i_B &= I_m \cos(\omega t + \lambda_0 + \theta - 120^\circ) \\ i_C &= I_m \cos(\omega t + \lambda_0 + \theta - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2.3-90)$$

式中: λ_0 为电动机静止时 d 轴与 A 相轴线的夹角。

自控式同步电动机变频调速系统主要由同步电动机、变频器、转子位置检测器和控制单元组成,如图 2.3-70 所示。控制单元的作用主要是判明转子的真实位置和转速后,依照式 (2.3-90) 产生控制信号以控制变频器输出电流(电压)的频率、幅值和相位,使电动机同步转速跟踪转子转速,从而实现自控式变频调速。



图 2.3-70 同步电动机自控式变频调速系统框图

与他控式变频调速相比, 自控式同步电动机变频调速最大的特点就是能从根本上消除同步电动机转子振荡和失步的隐患。自控式同步电动机变频调速系统所用的变频装置是非独立的, 变频装置的输出频率由电动机轴上所带转子位置检测器控制, 由其组成的电源频率自动跟踪转子位置的闭环系统使定子旋转磁场的转速和转子的旋转转速相等, 始终保持同步, 因此, 不会由于负载冲击等原因造成失步现象。

(2) 基于气隙磁场定向的同步电动机矢量控制。同步电动机矢量控制主要包括基于阻尼磁场定向的矢量控制、基于定子磁场定向的矢量控制、基于转子磁场定向的矢量控制和基于气隙磁场定向的矢量控制等方式。

阻尼绕组在普通同步电动机的起动过程中起着重要的作用, 但对于变频调速的同步电动机是不必要的, 并且稳态运行时阻尼绕组中存在感应电流, 这将引起转矩脉动和谐波损耗, 阻尼绕组不利于稳态运行, 所以基于阻尼磁场定向的矢量控制方式应用也相对较少。因为同步电动机通常采用基于同步旋转坐标系下的数学模型进行分析, 所以对定子磁链进行估算变得相对较复杂, 基于定子磁场定向的同步电动机控制方法也很少应用。转子磁场定向控制方法系统简单, 但随着负载的增加, 该控制策略会造成定子电流增大, 从而使定子电压大幅度升高, 同时使电动机功率因数变低, 这对于大型同步电动机调速系统是不经济的。因此, 目前高性能、大中容量的同步电动机调速系统多采用基于气隙磁场定向的矢量控制系统。

将定向坐标系的 M 轴与同步电动机的气隙磁链矢量 ψ 重合, 如图 2.3-71 所示, 可以得出同步电动机基于气隙磁场定向的数学模型系列方程式, 即

$$\left. \begin{aligned} i^s &= i_M^s + j i_T^s \\ i_M^s &= i^s \cos \theta \\ i_T^s &= i^s \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2.3-91)$$

式中: i^s 为定子电流; i_T^s 为 i^s 在 T 轴上的分量; i_M^s 为 i^s 在 M 轴上的分量; θ 为定转子磁动势夹角。

$$\left. \begin{aligned} i^e &= i_M^e + j i_T^e \\ i_M^e &= i^e \cos \varphi_L \\ i_T^e &= -i^e \sin \varphi_L \end{aligned} \right\} \quad (2.3-92)$$

式中: i^e 为励磁电流; i_M^e 为 i^e 在 M 轴上的分量; i_T^e 为 i^e

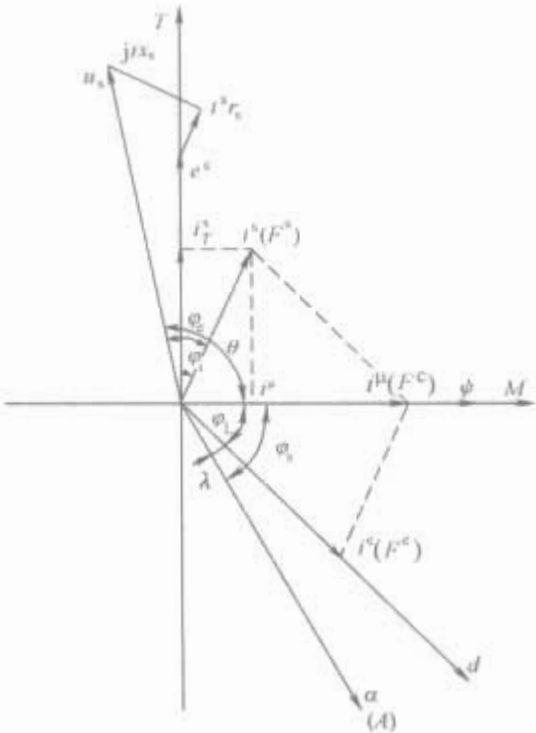


图 2.3-71 同步电动机矢量图

在 T 轴上的分量; φ_L 为外功率因数角。

$$i^{\mu} = i_M^s + i_M^e \quad (2.3-93)$$

$$\psi = L_{md}(i_M^s + i_M^e) = L_{md}i^{\mu} \quad (2.3-94)$$

$$T_e = p_m \psi i_T^s \quad (2.3-95)$$

式中: i^{μ} 为磁化电流; L_{md} 为定转子绕组之间在 d 轴的互感; T_e 为电磁转矩, p_m 为电动机极对数; ψ 为气隙磁链。

由式 (2.3-94) 可知, 同步电动机气隙磁链定向控制的关键是保证气隙磁链恒定, 这样只需控制定子电流的转矩分量 i_T^s 就可以方便、灵活地控制其电磁转矩, 此时同步电动机的电磁转矩只与定子电流的转矩分量 i_T^s 成简单的正比关系。

准确辨识气隙磁链的大小和空间位置是基于气隙磁链定向控制一个关键问题。气隙磁链常用的有电流模型、电压模型和混合模型。电流模型是利用定子电流的 2 个分量的给定值和磁化电流的期望值计算出期望的负载角 φ_L , 然后与转子位置检测器实际检测到的转子位置角 λ 相加, 就可获得期望的气隙磁链位置角 φ_s , 这样可近似地辨识出气隙磁链的空间位置, 并顺便计算出转子励磁电流的给定值 i^{e*} 。

由图 2.3-71 可以得到电流模型的下列各式, 即

$$i_M^{s*} = i_T^{s*} \operatorname{tg} \varphi_L \quad (2.3-96)$$

$$i_M^{e*} = i_T^{s*} - i_M^{s*} \quad (2.3-97)$$

$$i_T^{e*} = -i_T^{s*} \quad (2.3-98)$$

$$i^{e*} = \sqrt{(i_M^{e*})^2 + (i_T^{e*})^2} = \sqrt{(i_T^{s*})^2 + (i^{\mu*} - i_M^{s*})^2} \quad (2.3-99)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_L^* &= \frac{i_M^{e*}}{i^{e*}} = \frac{i^{\mu*} - i_M^{s*}}{i^{e*}} \\ \sin \varphi_L^* &= -\frac{i_T^{e*}}{i^{e*}} = \frac{i_T^{s*}}{i^{e*}} \end{aligned} \right\} \quad (2.3-100)$$

$$\varphi_s^* = \varphi_L^* + \lambda \quad (2.3-101)$$

式中: φ_L 为内功率因数角; 上述各式中上标带 “*” 的量为该量的给定或期望值。

知道定向坐标轴 (M 轴) 的准确位置后, 在旋转的定向坐标系中得到的定子电流 2 个分量的给定值 i_M^{s*} 、 i_T^{s*} 即矢量控制中的期望值, 只要实际电动机中流过的三相定子电流合成后能抽象分解 (在 M — T 坐标系) 出和给定值一样大小的 2 个分量, 说明同步电动机正在按矢量控制的要求运行。由于作用到实际电动机中的电流仍为三相交流电流, 而定子的转矩分量 i_T^s 和磁化分量 i_M^s 在旋转坐标系中均为 “直流量”, 因此, 矢量控制的另一任务是: 根据给定的定子电流磁化分量 i_M^s 、转矩分量 i_T^s 及计算出的 φ_L 、 φ_s 角, 进行坐标变换, 把定向坐标系中的量变换成三相静止坐标系中的量。

根据以上控制方程可以实现使用电流模型的同步电动机矢量控制系统原理图, 如图 2.3-72 所示。电压模型的任务是根据定子电流、电压实际测量值经 3/2 变换后得到的 i_{α}^s 、 i_{β}^s 、 u_{α}^s 、 u_{β}^s , 计算出气隙磁链的幅值 ψ 和位置角 φ_s (定子 α 轴到 M 轴间夹角), 如图 2.3-73 所示。

同步电动机气隙磁链矢量在 α 轴上的分量为

表 2.3-23 牵引变流器不同的冷却方式及特点

项目	空气冷却	热管冷却	沸腾冷却	油浸式冷却	油盒式冷却	绝缘水冷却	非绝缘水冷却
热流路径	半导体元件→散热器（或电气器件→外壳）→空气（或装置内部空气→空气热交换器→空气）（分为自然空气冷却和强迫空气冷却）	半导体元件→散热器基板→热管→散热翅片→空气（分为自然空气冷却和强迫空气冷却）	（一般为浸式冷却）半导体元件→散热器（或电气器件→外壳）→液体蒸发→冷凝→散热翅片→空气	半导体元件→元件→散热器（或电气器件→外壳）→冷却液体→油→空气热交换器→空气	半导体元件→散热器→冷却液体→油→空气热交换器→空气	半导体元件→散热器（或电气器件→外壳或内表面）→去离子水→水→空气热交换器→空气（需同时安装去离子装置）	半导体元件→导热绝缘层→散热器→水→水→空气热交换器→空气
冷却介质	空气	水、甲醇、胺	氟利昂、其他代氟利昂绝缘液体	硅油，变压器油	硅油，变压器油	水+防冻液	水+防冻液+防生物、防锈剂
流体动力源	自然对流或风机	蒸汽压，毛细管力	蒸汽压、毛细管力或泵	泵	泵	泵	泵
装置体积	大/中	小	小	小	小	小	小
复杂程度	简单	简单	一般	一般	复杂	复杂	复杂
绝缘要求	低	低	低	低	低	高	高
对环境的污染	无	无	中	中	中	无	无
对空气质量的要求	高	中	低	低	低	低	低
机车车辆上的应用范围	主要用于对体积要求不高或待冷却的点不多、热流密度不高的场合，如直流传动整流器、动力分散交流传动牵引变流器、列车供电整流器、辅助电源等	应用范围广，主要用于待冷却的点不很多、热流密度高的场合，如各种机车牵引变流器、地铁车辆牵引变流器、供电整流器、辅助电源等	主要用于待冷却的点不很多、热流密度高的场合，多用于大功率牵引变流器，如干线电力机车交流传动牵引变流器等	主要用于待冷却的点多、热流密度高的场合，多用于大功率牵引变流器，如干线电力机车交流传动牵引变流器等。在欧洲机车上应用较多	主要用于待冷却的点多、热流密度高的场合，多用于大功率牵引变流器，如干线电力机车交流传动牵引变流器等。在欧洲机车上应用较多	主要用于待冷却的点多、热流密度高的场合，多用于大功率牵引变流器，如干线电力机车交流传动牵引变流器等。在欧洲机车上应用较多	主要用于待冷却的点多、热流密度高的场合，多用于大功率牵引变流器，如干线电力机车交流传动牵引变流器等。在欧洲机车上应用较多

- (2) 元件或器件的功率损耗热流密度。

(3) 对电气绝缘的要求。

(4) 防尘和密封的要求。

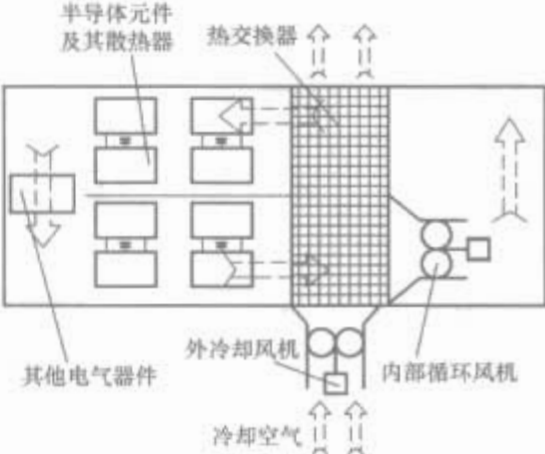
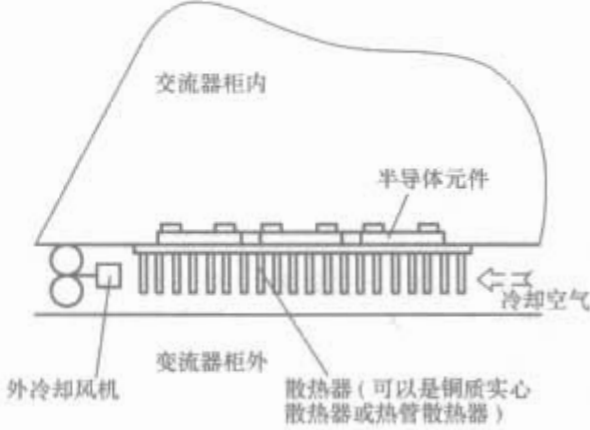
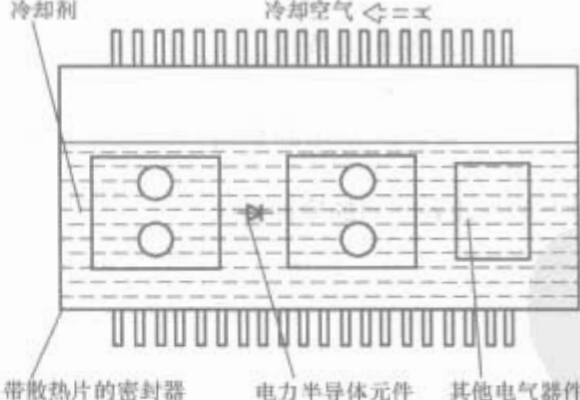
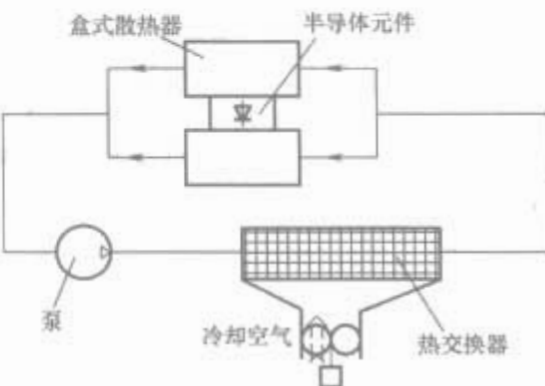
(5) 冷却系统的成本。
- (6) 各厂商的应用习惯、生产工艺及对各种冷却系统应用的研究程度。

确定了冷却方式后，具体的冷却结构也随之确定了，表 2.3-24 给出的是国内外机车车辆各种变流器常用的冷却结构。

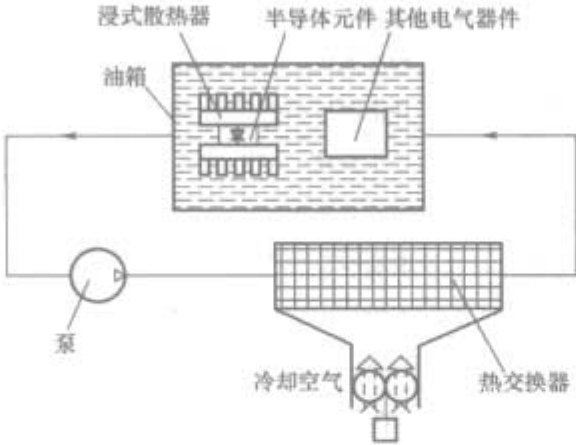
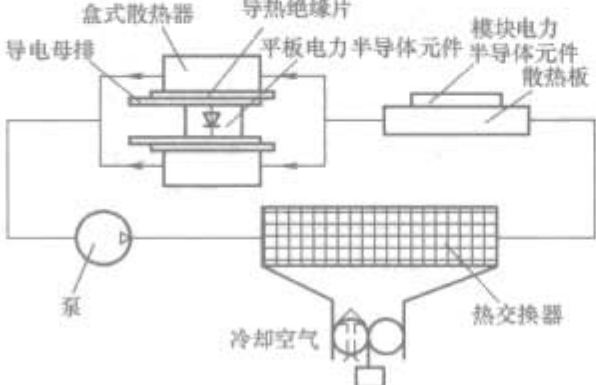
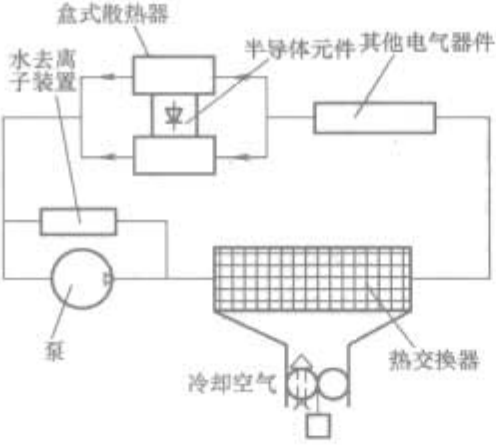
表 2.3-24 国内外机车车辆各种变流器常用的冷却结构

冷却结构型式	结构示意图	结构特点
自然风冷或走行风冷却		直接利用车体外空气冷却。一般用于城轨车辆、动车组等地板下安装的功率较小的主变流器。它无辅助风机系统，可靠性高，无噪声，但只适合于带绝缘底板或作了导热绝缘处理的半导体元件，且不适合于柜内其他电气器件的冷却

续表

冷却结构型式	结构示意图	结 构 特 点
直接强迫风冷 (冷却空气直接流过 电气部件)		空气直接流过半导体元件散热器压装组件和其他电气器件外壳，如我国直流传动的韶山各型电力机车整流器、东风各型内燃机车整流器等，均采用此结构。昆明动车组的整流器在地板下安装，也采用了此结构。其结构简单、可靠性高，但对空气净化要求高
二次通风冷却		有 2 级通风回路，内部回路把半导体元件散热器上的热量和其他电气器件的热量带到热交换器内，再由外部通风回路把热量带走。这样可以保证柜内绝对清洁。此结构用于广州地铁 1 号线车辆的主变流器（Siemens 产品）中。此结构散热效率不高，体积较大
强迫风冷（冷却 空气不直接流过电 气部件）		电气部分与风道空间隔离，冷却空气不直接吹到电气部件上，保证内部清洁，此种结构用于我国“中原之星”动车组主变流器、“先锋”号动车组主变流器、内燃 NJ1 机车主变流器等。结构简单，但只能适合于带绝缘底板的半导体器件或作导热绝缘处理，且不适合于柜内其他电气器件的冷却
沸腾冷却		把半导体器件（包括其他电气部件）装入一个密闭的容器内，注入代氟制冷剂。通过沸腾将热量带到容器外壁的散热翅片上。此结构应用主要见 Siemens 的 GTO 主变流器中，冷却效果好，但可靠性要求高，维护困难
油盒式冷却		具有绝缘能力的油直接流过与半导体元件压装在一起的盒式散热器内进行冷却，此结构见于 ABB 公司早期交流传动机车主变流器（BR120）、我国的 AC4000 交流传动原型机车、奥地利 Elin 公司的交流传动机车上。冷却效果与绝缘效果均很好，但对环境污染较大，并易燃，且不适合于柜内其他电气器件的冷却，现已很少采用

续表

冷却结构型式	结构示意图	结构特点
油浸式冷却		把变流器的电力半导体及其他电气器件直接浸入具有绝缘能力的油中，并通过油循环进行冷却，此种形式见于早期 ABB 公司主变流器中。冷却效果与绝缘效果均很好，但对环境污染较大，并易燃，现已很少采用
非去离子水冷却		采用水加防冻剂直接冷却散热器，电力半导体元件如果是带底板绝缘的（如 IGBT），可直接装在散热器上，否则（如 GTO）需用导热绝缘材料隔离。我国“蓝箭”号 IPM 机组、4413kW（6000hp）内燃交流传动机车均采用此技术。冷却回路易于实现，冷却效果好，但不适合于其他电气器件的冷却
去离子水冷却		在水系统中加入去离子回路，使系统的水具有很高的绝缘性能，可直接用它流过带电的半导体元件散热器或其他电气器件来实现冷却，而不需要加绝缘隔离。特别适用于平板型电力半导体器件，如 GTO、晶闸管等，以及水冷电阻器、水冷电抗器等器件。我国“奥星”交流传动机车、3677kW（5000hp）内燃交流传动机车、“中华之星”交流传动动车组等均采用此技术

2.7.2 牵引变流器的热计算

初步确定了牵引变流器的冷却方式和冷却结构后，还要进行热计算以确定各项冷却参数，然后进行具体的冷却系统和冷却结构设计。热计算的正确与否直接关系到半导体元件、电容器、电阻器等温度敏感器件和大功率器件的工作温度，对牵引变流器的可靠性至关重要。

一般来说，牵引变流器热计算的步骤如下：

（1）明确设计依据。设计依据一般是根据具体机车车辆牵引系统的具体要求和有关的国家标准或行业标准，形成的牵引变流器技术条件。与热计算有关的部分有：

- 1) 电路形式及电流、电压及功率参数。
- 2) 半导体元件型号及其串并联组合形式。
- 3) 其他电气元件的参数。
- 4) 环境条件参数。
- 5) 冷却条件参数。

（2）计算各元器件在正常工况下的最大热损耗。根据主电路分析得出的半导体元件及其他电气器件的工作电流、电压以及各元件和器件本身的有关参数，分别计算出每个半导体元件及其他电气器件在正常工况下的最大热损耗。

（3）计算整机在正常工况下的最大热损耗。整机的最大热损耗并不等于各元器件最大热损耗之和，因为整机热损耗

最大时刻各元器件的热损耗并不一定都在最大值。

（4）确定半导体元件散热器。根据结温限值、元件最大热损耗、环境条件等计算确定半导体元件散热器的热阻，依此进行选型或试制。

（5）确定其他电气器件的热参数。根据各自器件的热损耗、温度限值、冷却条件，计算确定其热参数，作为选型或试制的依据。

（6）确定冷却风量。根据整机热损耗，规定的温升限值、温度和湿度、海拔等数据，考虑元件散热器的要求，综合计算确定冷却风量或流量。

由于牵引变流器冷却设计的复杂性，设计结果经常与实际情况存在一定误差，即使计算很精确，也可能由于结构设计不合理造成牵引变流器内局部过热损坏半导体元件和电气器件，所以最终还需要通过后续的试验加以验证。

2.8 试验

2.8.1 试验依据、标准及试验方法

2.8.1.1 试验分类及标准依据

牵引变流器制造完毕，在交付用户使用前，必须按照标准进行各种严格的试验。根据标准规定，牵引变流器的试验分为 3 类：型式试验、例行试验与研究性试验。

此外,按试验与检测对象及范围来划分,牵引变流器试验也可分为单体装置试验与综合试验。单体装置试验的目的是为了检查牵引变流器的加工、制造及组装水平是否合格,各种技术性能是否满足要求。我国牵引变流器单体装置试验采用TB/T 2437—2006《机车车辆用电力变流器特性和试验方法》。综合试验是将牵引变流器与其牵引供电系统、负载系统(如牵引电动机)、控制系统、车辆信息控制装置等一起或与其中的一部分装置组合进行的试验,目的是检测牵引变流器在牵引传动系统中的各项功能是否正常,各项指标是否满足要求。对于牵引变流器与牵引电动机之间的综合试验,我国采用TB/T 3117—2005《铁路应用机车车辆逆变器供电的交流电动机及其控制系统的综合试验》、IEC 61377—2—2002《铁路设施 机车车辆 联合试验 第2部分:反向直流牵引电动机及其控制设备》、IEC 61377—3—2002《铁路设施 铁路车辆 第3部分:交流电动机,间接变流器及其他控制系统的联合试验》。

牵引变流器的单体装置试验一般为例行试验,每台都必须进行,也有个别项目属于型式试验或研究性试验。综合试验全部为型式试验或研究性试验。

2.8.1.2 试验项目

牵引变流器一般包括门极触发单元、控制单元等在内的电子装置,它们应按IEC 60571—1998或TB/T 3021—2001《铁道机车车辆电子装置》提前作完试验,这里主要介绍牵引变流器的总体试验项目。

按照试验标准,牵引变流器的单体装置应进行表2.3-25给出的试验项目。

直流电传动系统牵引变流器,如相控整流器,往往不包含传动控制单元,一般只需完成表2.3-25中的单体装置试验即可。但作为直流电传动系统的一个重要环节,可以参与表2.3-26的综合试验项目,从而考察整个系统的工作性能,检测直流牵引电动机在实际系统中的工作特性及性能指标。表2.3-26中有的项目可能与变流器单体装置试验项目重复,在单体装置试验时可省掉该项目。

表 2.3-25 牵引变流器单体装置试验项目

试验项目	型式试验	例行试验	标准文件
目检——外形	X	X	IEC 61287—12.4.6.1
尺寸和公差	X		IEC 61287—12.4.6.2
称重	X, 选项		IEC 61287—12.4.6.3
标志	X	X	IEC 61287—12.4.6.4
冷却	X		IEC 61287—12.4.6.5a) 和 b)
过滤器的有效性	X, 选项		IEC 61287—12.4.6.5c)
保护和测量装置	X	X	IEC 61287—12.4.6.6
触发设备	X	X	IEC 61287—12.4.6.7
轻载	X	X	IEC 61287—12.4.6.9
换流	X		IEC 61287—12.4.6.10
噪声	X		IEC 61287—12.4.6.11
温升	X		IEC 61287—12.4.6.12
功率损耗测定	X		IEC 61287—12.4.6.13
供电过电压和瞬态能量	X		IEC 61287—12.4.6.14
负载突变	X, 选项		IEC 61287—12.4.6.15
绝缘电阻	X	X	IEC 61287—12.4.6.16

续表

试验项目	型式试验	例行试验	标准文件
介质	X	X	IEC 61287—12.4.6.17
局部放电	X, 选项	X, 选项	IEC 61287—12.4.6.18
冲击电压试验	X, 选项		IEC 61287—12.4.6.19
安全要求	X		IEC 61287—12.4.6.20
振动和冲击	X		IEC 61287—12.4.6.21
密封性	X		IEC 61287—12.4.6.22
干扰	X		IEC 61287—12.4.6.23
负载脉动电流	X		IEC 61287—13.2.2.2 或 3.3.2.3
不同输出端的单独试验	X	X	IEC 61287—13.2.2.3 或 3.3.2.5
输出电压试验	X		IEC 61287—13.3.2.1

注 表 2.3-25~表 2.3-28 中“X”表示该试验项目需进行,“X, 选项”表示该试验项目为选择性试验项目。

表 2.3-26 直流电传动系统牵引变流器可参与的综合试验项目

试验项目	型式试验	研究性试验	标准文件	备 注
温升试验	X		IEC 61377—26.3	与变流器单体装置试验重复
换相试验	X		IEC 61377—26.4	
转矩	X		IEC 61377—26.5.1	
满转矩的全速范围试验	X		IEC 61377—26.5.1.2	
效率特性	X, 选项		IEC 61377—26.5.2	
控制装置的电源	X, 选项		IEC 61377—26.6.1	
直流供电电源	X, 选项		IEC 61377—26.6.2	
短时直流电源中断	X, 选项		IEC 61377—26.6.3	
输入电压突变	X, 选项		IEC 61377—26.6.4	
斩波器输入电流中的谐波	X, 选项		IEC 61377—26.6.5	
干扰试验	X, 选项		IEC 61377—26.6.6	与变流器单体装置试验重复
研究性试验		X	IEC 61377—26.7	可能与变流器单体装置试验重复

表 2.3-27 交流电传动系统牵引变流器的综合试验项目

试验项目	型式试验	研究性试验	标准文件	备 注
温升试验	X		IEC 61377—15.3 或 IEC 61377—37.3	与牵引变流器单体装置试验重复
并联电动机附加试验	X		IEC 61377—15.2.5 或 IEC 61377—37.4	如果系统负载为多台电动机并联

续表				
试验项目	型式试验	研究性试验	标准文件	备 注
电动机热态转矩特性	X		IEC 61377—15.4.1.2 或 IEC 61377—37.5.1.2	
电动机冷态转矩特性			IEC 61377—15.4.1.3 或 IEC 61377—37.5.1.3	
满转矩的全速范围试验	X		IEC 61377—15.4.1.4 或 IEC 61377—37.5.1.4	
效率特性	X,选项		IEC 61377—15.4.2 或 IEC 61377—37.5.2	
控制装置的电源	X		IEC 61377—15.5.1.1 或 IEC 61377—37.6.1.1	
牵引供电电压	X		IEC 61377—15.5.1.2 或 IEC 61377—37.6.1.2	
牵引供电电源中断			IEC 61377—15.5.1.3 或 IEC 61377—37.6.1.3	
牵引供电电源突变	X,选项		IEC 61377—37.6.1.4	与牵引变流器单体装置试验重复
变流器输入电流中的谐波	X,选项		IEC 61377—15.5.2 或 IEC 61377—37.6.2	
干扰试验	X,选项		IEC 61377—37.6.3	
故障情况		X	IEC 61377—15.5.1.3 或 IEC 61377—37.7.1	
负载变化		X	IEC 61377—37.7.2	

交流电传动系统牵引变流器，如交—直—交牵引变流器或地铁牵引逆变器，往往集成了传动控制单元。为了检测传动控制单元的各项功能是否能够正确执行及满足要求，一般需进行表 2.3-27 给出的综合试验项目。当综合试验项目与各部件（包括牵引电动机）的单体装置试验项目重复时，可以省掉该项目的单体装置试验。

如上所述，单体装置试验的一些项目可在综合试验时进行，如温升试验、功率损耗测定试验、负载突变试验、干扰试验等；也可以在一次试验中进行多个试验项目，如综合系统试验中温升试验与效率特性试验，效率特性试验应在温升试验结束时刻进行。如果某一项试验被完全包括在另一项试验中，则试验大纲中可将此项试验去掉，不必非得将标准规定的试验项目一一列出。

除上述标准规定的试验项目外，实际生产中，一般还对牵引变流器进行以下试验，见表 2.3-28。

表 2.3-28 变流器补充试验项目			
试验项目	型式试验	例行试验	备 注
各部件单元的分试验或调试	X	X	可与别的试验一起进行 如果变流器通过车辆信息控制装置控制，则需进行此项试验，属综合试验
配线或布线检查	X	X	
弱电部分及控制逻辑的检查	X	X	
负载考核试验	X	X,选项	
车辆信息控制装置组合试验	X		

2.8.1.3 试验内容及方法

表 2.3-25～表 2.3-27 各项试验的试验内容及方法在试验项目所列的标准文件一栏中已经作了比较详细的介绍。这里仅就几个主要试验项目和补充试验项目（表 2.3-28）进行介绍。

（1）各部件单元的分试验或调试（包含型式试验与例行试验）。除上面讲到的门极单元、控制装置需依照其他标准进行调试与试验外，在实际设计中，为了缩短产品设计周期，减少重复设计，提高批量生产能力，产品的模块化设计程度越来越高，牵引变流器往往包括一些通用化模块或子部件单元，很多单元可以独立完成一部分功能，如变流器模块等，此时，应对该模块进行单独试验或调试。各部件单元的分试验或调试一般在装入牵引变流器之前进行，根据实际情况也可在牵引变流器组装之后进行，如检测风机、接触器、传感器等是否正常。

（2）配线或布线检查（型式试验与例行试验）。牵引变流器或各个子部件单元组装布线完毕后，在各项功能试验前应对照布线表，检查控制电路和主电路的布线是否正确，检查其终端处理（压接）是否符合要求，连线标识（线号标识）是否正确且方向是否一致。

（3）弱电部分及控制逻辑的检查。控制单元或其他弱电单元的牵引变流器，在接通主电路之前，应先对弱电部分进行通电检测。检测过程一般如下：

- 1) 接通控制电源，观察各电路板指示灯是否正常，各接触器、继电器等是否按逻辑顺序动作。
- 2) 检测各电流、电压传感器等输出是否正常。
- 3) 进行变流器逻辑测试，如通过测试系统发送充电短接、起动或停止等命令，检查各电路板指示灯是否正常，各接触器、继电器等是否按逻辑顺序动作。
- 4) 将控制电源开关若干次，系统应一切正常。

（4）保护和测量装置试验。保护装置应能按照控制系统的指令，进行正常的保护动作；测量装置应能检测出发生的故障，反馈给控制系统。该试验的目的是验证保护和测量装置在整个工况范围内工作是否正常。

试验过程中根据系统要求，通过试验设备或手动操作模拟故障发生情形反馈给牵引变流器系统，测试变流器的各种保护功能是否正常。通常模拟的故障情形有过电压、过电流、过热、缺相、元件故障等，可根据具体系统要求选取需要进行的保护功能检查项目。

（5）触发设备（触发部件）试验。目的是验证触发部件或单元是否满足要求。

对于晶闸管来说，主要是触发脉冲应符合规范的要求；对 GTO 与 IGBT 来说，具有专门的门极驱动电路，门极驱动电路应能根据控制指令开通与关断 GTO 或 IGBT 元件。

如果触发部件是牵引变流器子部件的一部分，如牵引变流器模块，则此项试验也可以在子部件试验中完成。

（6）换相试验。该项试验可在负载考核试验的短时过载考核试验中进行。当牵引变流器使用的半导体器件为 IGBT 元件时，IGBT 元件一般进行了大电流考核试验与元件短路试验。大电流考核试验是在 IGBT 元件可能工作的最高直流电压下进行的，考核电流往往比牵引变流器所需最大电流大很多，一般为 IGBT 元件能够长时间工作而不会损坏的最大工作电流（过热除外）。元件短路试验是对 IGBT 元件进行的各种短路试验，如工作前将负载短路或工作过程中负载突然短路，负载用电缆短路或 IGBT 桥臂短路等，目的是检测 IGBT 元件在最恶劣的工作情形下能否可靠工作。IGBT 元

件大电流考核试验与短路试验属元件及驱动触发装置的研究性试验，一般只对不同型号的 IGBT 元件及其驱动触发装置进行一次型式试验，可用于不同型号的 IGBT 牵引变流器，故 IGBT 牵引变流器试验项目中可省掉换相试验项目。

(7) 负载考核试验。负载考核试验是体现牵引变流器性能指标的一个重要试验，型式试验中必须包括此项试验，例行试验可不进行。在实际试验中，该项试验可与别的试验一起进行，如温升试验或综合试验中的转矩特性试验等。负载为交流异步电动机的交—直—交牵引变流器或地铁车牵引逆变器，当不进行系统综合试验时，该试验也可通过试验电动机堵转来进行。负载考核试验包括额定负载考核试验与短时过载考核试验。

1) 额定负载考核试验。目的是检查牵引变流器能否到达额定的技术性能指标。一般试验步骤如下：

a. 起动冷却系统（与实际运行时相符，或模拟实际运行条件）；

b. 在额定输入电压下，起动牵引变流器，调节给定与输出负载，使牵引变流器输出电流电压为额定值，连续运行一段时间（如 1h 以上），使变流器温升达到稳定值，检测牵引变流器输出状态是否正常，温升是否稳定，且各项指标均在规定值以下。检测冷却系统参数是否正常，如出风口温升等。

2) 短时过载考核试验。如果牵引电动机在起动时要求一个比额定值大得多的起动电流，则牵引变流器必须能够短时正常输出该电流，且系统应一切工作正常。

该试验应在额定负载考核试验结束时进行，直接调节给定或调整负载，使牵引变流器输出达到要考核的设定值，连续运行一定时间（如 10min，参照技术条件），检测牵引变流器输出状态是否正常，温升等各项指标是否在规定值以下。检测冷却系统参数是否正常，如出风口温升等。

(8) 车辆信息控制装置组合试验。目的是验证牵引变流器与车辆信息控制装置的接口是否正常工作。试验内容一般包括：

1) 确认牵引变流器能够正确接收与执行车辆信息控制装置发出的信息或命令；

2) 确认车辆信息控制装置能够正确接收牵引变流器发

出的各种状态信息，如牵引变流器是否存在故障、电流电压值等。

该试验属于型式试验，可以在试验场地用模拟的试验系统进行，也可在车上联调时进行。

2.8.2 试验设备

牵引变流器是牵引传动系统中的重要环节，作用是将输入电源变换成牵引负载所需要的供电电源，有的还将传动系统的传动控制单元集成在内。因此，对牵引变流器进行功能及性能试验时，试验系统必须包括模拟或实际工作时牵引变流器的输入电源与工作负载。

牵引变流器试验负载基本上可分为直接负载与反馈负载两种。直接负载是将牵引变流器试验时输出的能量不进行反馈再利用，最终消耗在负载电阻及系统的损耗上等。该负载系统一般应用于牵引变流器输出能量不大的情形，如系统功能检查调试，可降低噪声。反馈型负载则是将牵引变流器输出接试验用的牵引电动机，牵引电动机再通过机械耦合（直流牵引电动机可能还有电方面的耦合）带动发电机运行，使发电机成为它的机械负载，发电机输出的电能直接或通过同步发电机组、陪试变流器、变压器等中间环节反馈给输入电网，因此，试验中所消耗的电能为系统本身损耗之和。在大功率试验中，该负载系统经济很多。

2.8.2.1 交流电传动系统牵引变流器的试验系统及设备

如前所述，交流电传动系统牵引变流器往往集成了传动控制单元等，需要增加一些控制系统的检测试验以及一些包括电动机在内的综合试验来验证牵引变流器及其传动控制单元的工作性能。

为适用于各类交流电传动系统牵引变流器，试验系统一般由几大部分组成，可根据要求进行组合。此外，系统不仅能对牵引变流器进行各项试验，往往也能对交流电传动系统其他部件进行各项试验，如牵引变压器、牵引电动机等，以及整个传动系统的综合试验，该系统也可称为交流电传动牵引试验系统。图 2.3-75 所示为一交流电传动牵引试验系统电路图，结构上主要由模拟供电系统、被试牵引变流器及反馈负载系统组成。当对其他部件进行试验时，牵引变流器为试验系统的陪试设备。

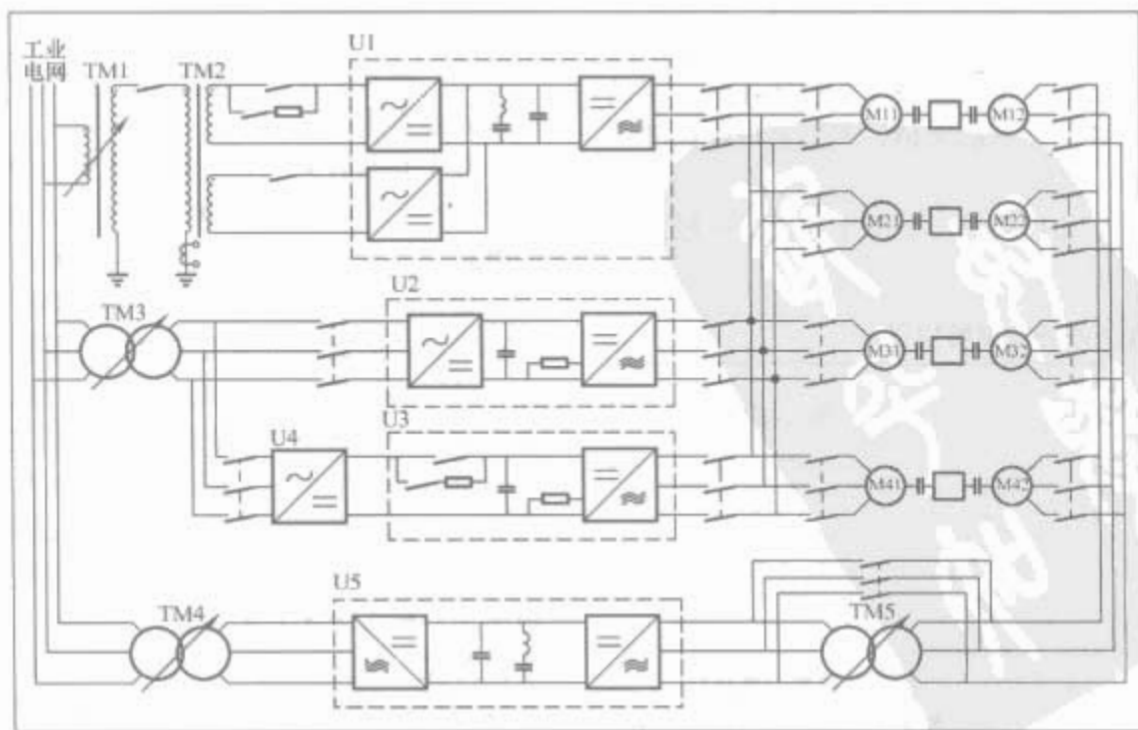


图 2.3-75 交流电传动牵引试验系统电路图

图 2.3-75 中虚线框内 U1、U2、U3 为 3 种被试牵引变流器，U1 为单相输入交—直—交牵引变流器，如现在普遍采用的中高速动车组牵引变流器，U1 交—直部分为二重单相整流器，当交—直部分为单重单相整流器时，牵引变流器输入只需 TM2 一个牵引绕组即可；U2 为三相输入交—直—交牵引变流器，如目前国产交流电传动内燃机车牵引变流器，柴油发电机输出三相交流电给牵引变流器供电；U3 为牵引逆变器，如地铁车、磁浮车牵引变流器，其输入为陪试三相整流器 U4 输出的直流电压；U5 为陪试交—直—交牵引变流器。

(1) 模拟供电系统。对于交—直—交牵引变流器（牵引变流器 U1）系统，我国干线牵引标称网压为单相交流 25kV、50Hz。在图 2.3-75 所示系统中，升压变压器 TM1 从工业电网中获得牵引标称电压。为模拟网压的波动，升压变压器 TM1 采用可以有级改变输出电压的特殊单相变压器，输出电压在一定范围内可调。TM1 输出的 50Hz 单相交流电经主断路器送到牵引变压器 TM2 的高压绕组，高压绕组的另一端经过电流互感器接地。牵引变压器 TM2 二次侧有 2 个牵引绕组，牵引绕组电压有级可调，分别供给牵引变流器的 2 个四象限变流器。

对于三相交—直—交牵引变流器（牵引变流器 U2）系统，通过特殊三相调压器 TM3 从工业电网中获得 50Hz 三相交流可调电压，直接送至牵引变流器的三相整流器。

对于牵引逆变器（变流器 U3）系统，调压器 TM3 的三相输出经整流器 U4 整流后获得可调直流电压，送到逆变器的输入端。

(2) 负载系统。图 2.3-75 所示系统中被试牵引变流器负载为反馈型负载，牵引变流器输出的电压频率可调的三相交流电供给一台或几台并联的异步牵引电动机 M11~M41（每台都可单独投切，试验时可根据需要进行选取），拖动与之机械相连的同型号陪试电动机 M12~M42。牵引时，M11~M41 为电动机，M12~M42 为发电机，输出的电能经陪试变流器 U5、变压器 TM4 反馈输入电网，给被试牵引变流器用；制动时，M12~M42 为电动机，M11~M41 为发电机，电网能量经变压器 TM4、陪试变流器 U5 给电机 M12~M42 供电，M11~M41 发出的电能经被试牵引变流器反馈回输入电网或消耗在制动电阻上。可调三相变压器 TM5 可以用于调节输入陪试变流器 U5 的电压，电压合适时也可用三相开关将 TM5 进行短接。

从上述的试验主电路工作原理可知，该系统在试验时采用了交流异步电机背靠背方式，且有 2 台变流器（被试牵引变流器与陪试变流器），使牵引与制动时能量能够双向循环流动，故该试验系统称为双变流器——电机能量互馈型交流电传动试验系统。

除图 2.3-75 中所示的试验装备外，作为一完善的试验系统，往往还包括各种检测装置（转矩转速测量仪、电流和电压传感器等）、数据采集处理系统、试验控制及操作平台等。

2.8.2.2 直流电传动系统牵引变流器试验系统及设备

相对于交流电传动系统牵引变流器，直流电传动系统牵引变流器试验项目可以少些，试验系统也可以简单些，主要原因是直流电动机控制相对简单，列车牵引方式一般为动力集中型，不需要很多套控制装置，故牵引电动机传动控制单元一般不置于牵引变流器内，而是由列车控制单元，如微机柜来完成。当系统（尤其是直流牵引电动机负载）能够对牵引变流器提出明确的技术性能指标时，牵引变流器只对该指

标进行试验验证即可。

与交流电传动牵引变流器试验系统一样，直流电传动系统牵引变流器试验系统也需要一模拟或实际的供电电源与负载系统。模拟供电电源也与图 2.3-75 中的供电电源类似，为标称牵引电网 25kV、50Hz，通过经牵引变压器供电、三相交流供电与直流供电 3 种方式分别给被试的单相相控整流器、三相相控整流器、斩波器等供电。负载也可直接负载与反馈负载，直接负载可采用 LR 串联的模拟负载，也可接直流同步发电机组，并将发电机输出的电能消耗在电阻负载上；反馈负载则可接直流同步发电机组，发电机输出的电能再通过其他环节送回电网。

3 牵引电动机

牵引电动机是产生机车或动车牵引动力的电动机，它可以是直流（脉流）、交流异步、交流同步旋转电动机，也可以是直线的非旋转电动机。它们都具有车辆要求的相似的牵引力和速度关系的牵引特性。近些年都采用变频调速性能更好的交流异步牵引电动机。

3.1 牵引电动机技术性能

3.1.1 牵引特性

牵引电动机种类繁多，但它们都有一个对应机车和动车的牵引力和速度关系的特性，即基本牵引特性，它们既可以代表机车或动车的性能，也可以通过车辆的动轮轮径和传动比的关系转换成牵引电动机的转矩和转速的关系。根据需要，牵引特性分为规定特性和典型特性。

(1) 规定特性。设计部门提交用户的符合相关标准规定的特性称为规定特性，是评定牵引电动机性能的依据，必须写入电动机的技术条件中。在通常情况下，该特性为供电系统标称电压下的电动机特性。

(2) 典型特性。型式试验结果得出的特性称为典型特性。除非另有规定，一般情况下，若电动机的电磁性能与以前为同一用户或相同用途制造的电动机的电磁性能相同，该电动机可采用原有电动机的典型特性曲线。在这种情况下，仅需通过例行试验来验证电动机是否与其特性一致。对于直流、脉流牵引电动机来讲，牵引特性表示为电动机在整个工作范围内平均转矩 T 、效率 η 、电机转速 n 与电枢电流 I 的函数关系，应该在不同的磁场削弱系数 β 下画出。脉流牵引电动机电流纹波系数对换向有影响，也可以标注在相应的曲线上。牵引特性曲线见图 2.3-76 (a)。制动时电动机作为直流他励发电机运行，其制动特性表示为电动机在整个工作范围内平均转矩 T 、效率 η 、电流 I 与电机转速 n 的函数关系，制动特性曲线见图 2.3-76 (b)。

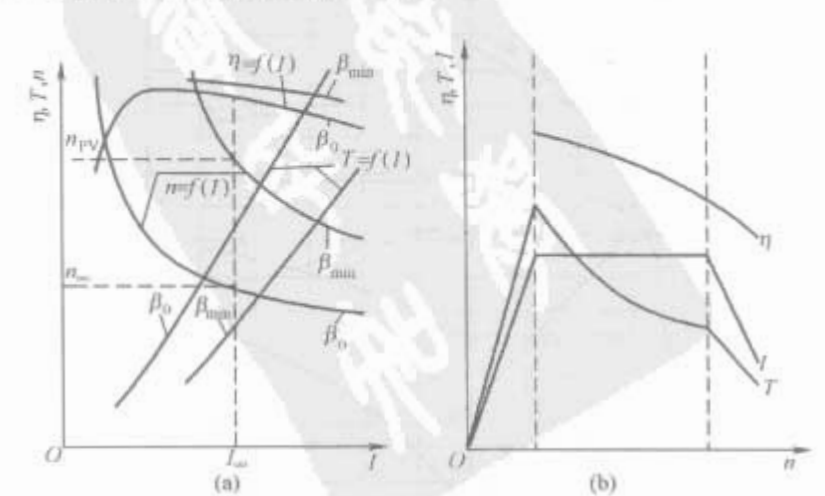


图 2.3-76 直（脉）流牵引电动机特性
(a) 牵引特性；(b) 制动特性

对于变频调速交流牵引电动机的规定特性和典型特性，自然要去掉电流纹波系数和磁场削弱系数。牵引特性除表示为电动机的线电压 U_2 、相电流 I_a 、功率 P_2 、定子频率 f_1 、效率 η (图 2.3-77 上用 ATA 表示)、功率因数 $\cos\varphi$ 外，异步牵引电动机还要补充转差率 s 、转子频率 f_2 、平均转矩 T 或牵引力和最大转矩倍数 T_m 和转速 n 或机车速度 v 的函数关系；同步牵引电动机要补充励磁电流。对于永磁同步牵引电动机，当然不需要励磁电流了。交流牵引电动机的牵引特性曲线见图 2.3-77。电压曲线用基波分量的方均根值来表示；电流曲线分别用基波分量的方均根值和全部电流分量的方均根值来表示。对用于制动工况的电动机，也应绘制出类似的特性曲线，该曲线表示为电动机的输出转矩或制动力、输出电功率、转差和转子频率与转速或机车速度的关系，它们为负值，处于第 4 象限。电动机的线电压 U_2 、相电流 I_a 、定子频率、功率因数、效率、最大转矩倍数和转速或机车速度的函数关系，它们为正值，处于第 1 象限。制动特性见图 2.3-78。

另外，可以用轮周牵引力和机车车辆速度替代电动机的转矩和转速来表示特性，此时要注明传动比、轮对直径和传动损耗。如果传动损耗采用约定值，则应按 TB/T 3001—2000《铁路机车车辆用电液变流器供电的交流电动机》规定选取。

图 2.3-77 和图 2.3-78 中的横坐标采用机车车辆速度来表示。

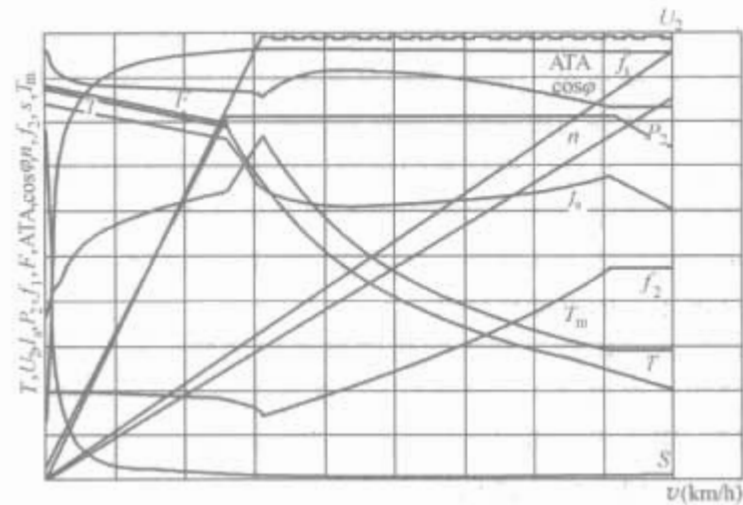


图 2.3-77 交流牵引电动机牵引特性

(3) 效率特性。效率特性应考虑到变流器供电产生的谐波损耗，同步电动机的励磁功率也应包括在损耗内。

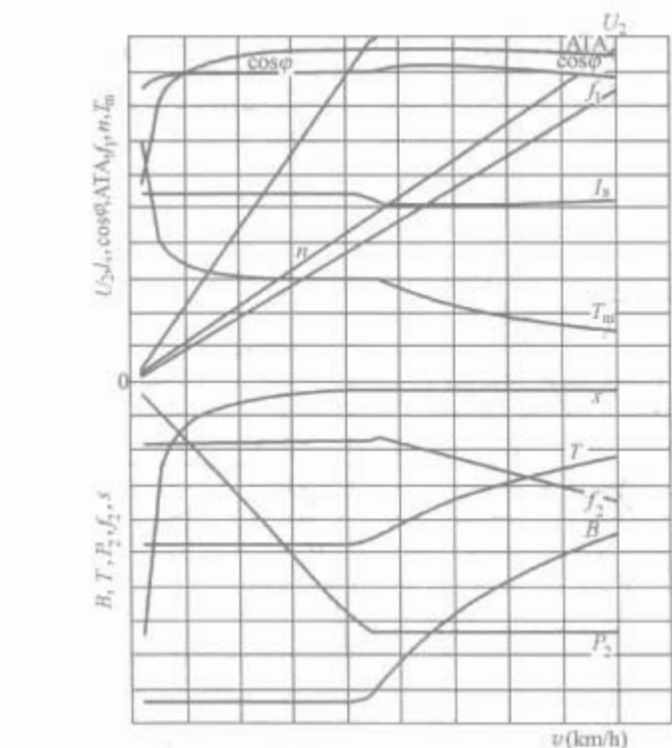


图 2.3-78 交流牵引电动机制动特性

对于牵引电动机除非另有规定，不论电动机是使用何种绝缘等级，它的所有特性均按绕组温度为 150℃ 来绘制，150℃ 称为电动机绕组的基准温度，应在特性曲线上注明。

3.1.2 牵引电动机定额

牵引电动机定额为制造厂规定的一组同时测得的电量和机械量，包括其持续时间及顺序。额定值系指定额中包含的任一参量的数值，分为以下几种：

(1) 连续定额。电动机在试验台上主变流器变频供电按规定的电气和机械条件长时间运行，温升不超过该绝缘等级给定的限值，同时也满足 TB/T 3001—2000 规定的其他相应要求时轴上所能输出的机械功率。因此，按需要可以规定若干个连续定额。

(2) 短时定额（如 1h）。电动机在试验台上主变流器变频供电按规定的条件从冷态起动，运行指定的时间（如 1h），温升不超过绝缘材料给定的限值，同时也满足 TB/T 3001—2000 规定的其他相应的要求时轴上所能输出的机械功率。

(3) 短时过载定额。规定电动机在试验台上主变流器变频供电按指定的条件开始试验，在运行指定的时间内，温升不超过绝缘材料给定的短时容许的限值时轴上所能输出的机械功率。

(4) 断续负载定额。规定电动机在主变流器变频供电、周期性负载下运行，在此周期内的最高温升不超过给出的限值。为了制造需要，把这种周期性主变流器变频供电的负载折换成温升相当的正弦电源供电的连续定额，以便出厂考核，该连续定额称为等效定额。

(5) 保证定额。制造厂保证的定额。一般情况下，保证定额指连续定额。在特殊情况下，根据用户需要，制造厂可以按协商结果采用短时定额或断续定额作为保证定额。

(6) 额定电压。电动机在保证定额下运行时，施加在该电动机上的线电压基波分量的方均根值。对于直接或间接由接触网供电的电动机，该额定电压通常是指当电动机电流为额定电流、接触网电压为标称电压时变流器可能施加在电动机端子上的最高电压（不包括瞬时值）。

(7) 额定转速。在保证定额时的转速。

(8) 最高电压。施加于电动机端子上的最高线电压基波分量的方均根值。

(9) 重复峰值电压。主变流器输出电压（非瞬变）波形的尖峰值。

(10) 最大工作电流。为规定特性上的最大电流值。

(11) 最大工作转速。该转速不应小于与机车最高运行速度相对应的值（此时车轮为金属轮时，其轮径为全磨耗；橡胶动轮时为最小滚动圆直径）。

(12) 最高运行速度的功率。对应机车或动车最高运行速度时牵引电动机轴上所能输出的机械功率。

3.1.3 基本参数的计算

牵引电动机设计前必须非常清楚地知道该牵引电动机使用在什么场合，包括牵引电动机采用什么悬挂安装方式，由于悬挂安装方式不同，会带来不同的振动和冲击条件。例如：用于货运机车因牵引力要大、速度低，故牵引电动机要求有较大的起动转矩，传动端轴承转速低但承受的径向负载大，电动机采用抱轴悬挂安装，要承受较大的振动和冲击，轴承接受的振动和冲击力大；用于客运机车或电动车组因要速度高、牵引力小，牵引电动机均要采用转向架悬挂、车体悬挂或半车体悬挂安装，工作条件与上述恰恰相反。这给牵引电动机结构设计带来不同的考虑。

牵引电动机设计前要确定下列与机车相关的基本参数。

(1) 电流种类。确定电机采用的电源型式，即直流、脉流和交流变频电源等。

(2) 机车、动车的轮周持续功率。

(3) 机车、动车的持续速度为

$$v_L = 3.6 P_2 \eta_k / F_L \tag{2.3-106}$$

式中： F_L 为机车、动车的牵引力，kN； P_2 为轮周持续功率，kW； η_k 为机械传动效率。

(4) 机车、动车的持续额定牵引力为

$$F_N = N F_e \tag{2.3-107}$$

式中： F_e 为一对动轮轮周上的牵引力，kN； N 为动轮数。

(5) 机车、动车的最高运行速度 v_{max} 。

(6) 牵引电动机的功率利用系数为

$$K_m = P_{vmax} / P_2 \tag{2.3-108}$$

式中： P_{vmax} 为最高运行速度时的功率，kW。

$K_m \leq 1$ ，异步牵引电动机因为电动机的励磁磁通由电网产生，与电网频率成反比，所以它的 K_m 值较高。如果 $K_m = 1$ ，则机车、动车的持续速度到最高运行速度之间的区域为机车、动车的恒功区。

(7) 牵引电动机的额定转速为

$$n_N = 5.3 \mu v_L / D_L \tag{2.3-109}$$

式中： μ 为传动比； D_L 为动轮半磨耗轮径，mm； v_L 为持续速度。

(8) 牵引电动机的额定转矩为

$$T_N = 9.55 P_2 / n_N \tag{2.3-110}$$

式中： T_N 为电动机的额定转矩，kN·m。

牵引电动机设计前，既可以将机车、动车的牵引特性直接作为牵引电动机的输入进行计算，也可以按用户转化的电动机的机械特性计算。

3.1.4 轴承与润滑

轴承与润滑问题一直是困扰牵引电动机可靠运行的关键问题。以前，为了维持牵引电动机正常工作，运行部门不得不采取定期检修、临修，不断加油和更换轴承等办法来维持，虽然浪费了大量轴承，但故障仍屡屡出现，运行成本很高。运行部门确实也一直在研究用什么方法来提高轴承工作的可靠性，例如在铁路提速以后不得不采用轴温报警和轴承故障诊断等措施来提示乘务人员，及时采取有效措施，防止轴承事故的发生和扩大。但是随着机车速度的提高，轴承的润滑问题越来越突出，必须重新认识润滑对轴承的关键作用，从摩擦学的角度来研究它们之间的关系，通过实际验证，寻找解决轴承问题的正确方法。大量试验和实际应用都证明：在牵引电动机运行中轴承问题的关键是如何解决好它的润滑。

3.1.4.1 润滑是轴承系统的关键

传统的电机设计观点，只按轴承制造厂给出的动负荷、静负荷系数及电动机承受的负载来选择轴承；按油脂厂的出厂标准和电动机的工作条件选择油脂，二者是独立的。电机制造厂没有条件进行轴承应用的研究，也没有意识到润滑是轴承运行中的关键问题。在设计时只是简单地要求轴承室加1/3~1/2的油脂，轴承内部加满油脂，没有从润滑的机理上考虑如何保证轴承运行时能充分润滑，仅仅在出厂试验时凭轴承的声音和检验员的经验判断轴承响声是否正常，是否符合出厂标准。因此，一旦轴承出了问题 and 响声不正常，就更换轴承。按现代润滑理论，充分润滑是轴承正常工作的保证。通过严格的科学实践验证，只有正确选择和采用优质润滑材料，在轴承的摩擦副之间才能建立足够强度的油膜。优质的润滑脂在轴承摩擦副之间能维持微磨损，润滑脂中的添加剂可以对轻微磨损及时修补、抛光。由于降低了轴承磨

损，再加上油脂的抗氧化、抗水解的特殊性能，油脂内部基油分子之间的动态损耗小，这样的油脂可以大大延长轴承的加油周期，延长轴承的寿命。我国“蓝箭”、“中华之星”、“先锋”号动车组高速电动机的轴承和润滑材料的验证研究，充分证明了润滑是轴承运行非常关键的要素。“蓝箭”动车组的牵引电动机采用了优质的、适配的润滑脂后，轴承的实际使用寿命大大超过了设计寿命。从轴承和润滑的相互关系看，应把润滑看成是轴承系统的关键部件，这一观念虽已提出多年，但在实际设计、应用中还未真正得到重视。

3.1.4.2 轴承的选择与计算

牵引电动机的轴承选择与齿轮传动形式有关，一般城轨车和动力分散动车组牵引电动机功率小，采用平行联轴节驱动模式，大功率机车和动力车采用小齿轮驱动模式。因此，对应的牵引电动机轴承有平行联轴节驱动模式和小齿轮驱动模式两种。

(1) 平行联轴节驱动模式电动机轴承计算（见图 2.3-79）。

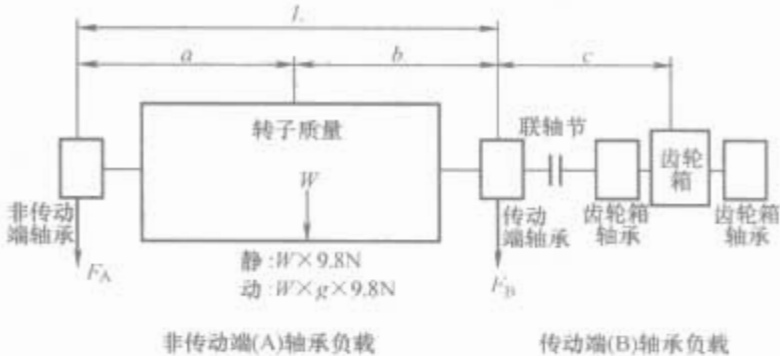


图 2.3-79 平行联轴节模式

小功率牵引电动机的转轴通过平行球关节联轴节连接齿轮箱的转轴，因此，传动端一般采用短圆柱轴承，非传动端轴承一般采用球轴承。从原理上讲，这一对轴承既不受径向力，也不需要承受轴向力。只承受电动机质量和球关节联轴节一半的质量。但又由于球关节联轴节的内齿可以在联轴节的外齿圈内轴向伸缩，故必须考虑球关节联轴节润滑油黏度在伸缩过程中产生的动态轴向力，一旦发现轴向力过大，就必须检查球关节联轴节的内外齿润滑是否正常，齿轮啮合表面有无磨损。

1) 轴承负载。

①非传动端（A端）负载。

静负载 $F_{sA} = 9.8 W b / L \tag{2.3-111}$

动负载 $F_{dA} = 9.8 g W b / L \tag{2.3-112}$

平均负载 $F_A = [(1-r) F_{sA}^P + r F_{dA}^P]^{1/P} \tag{2.3-113}$

式中： W 为转子的质量，kg； b 为转子重心到传动端轴承中心的距离，m； L 为非传动端轴承中心到传动端轴承中心的距离，m； g 为重力加速度值，9.8m/s²； r 为动负载作用的比例； P 为指数，球轴承 $P=3$ ；圆柱轴承 $P=10/3$ 。

②传动端（B端）负载。

静负载 $F_{sB} = 9.8 W a / L \tag{2.3-114}$

动负载 $F_{dB} = 9.8 g W a / L \tag{2.3-115}$

平均负载 $F_B = [(1-r) F_{sB}^P + r F_{dB}^P]^{1/P} \tag{2.3-116}$

式中： a 为转子重心到非传动端轴承中心的距离，m。

2) 轴承寿命。

非传动端（A端）轴承寿命 $L_{A10} = (C_{rA} / F_A)^{1/P} 10^6 \tag{2.3-117}$

走行距离寿命 $L_{sA} = \pi D_L L_{A10} / \mu \tag{2.3-118}$

式中： C_{rA} 为A端轴承基本额定动负荷系数； D_L 为机车或动车的车轮直径。

传动（B）端轴承轴承寿命 $L_{B10} = (C_{rB} / F_B)^{1/P} 10^6 \tag{2.3-119}$

走行距离寿命 $L_{sB} = \pi D_L L_{B10} / \mu$ (2.3-120)
式中: C_{rB} 为 B 端轴承基本额定动负荷系数。

(2) 小齿轮驱动模式电动机轴承计算。大功率牵引电动机的转轴上一般装有传动小齿轮, 传动过程中的径向推力大于轮缘牵引力, 如果电动机还要承受较大的轴向力, 就要采用三轴承结构, 传动端 1 个, 非传动端 2 个。第 3 轴承(四点接触式轴承)只承受轴向力, 不承受径向力, 安装在非传动端。其余 2 个均采用短圆柱轴承。

通常大功率牵引电动机不承受轴向力或承受少量的轴向力, 两端均采用短圆柱轴承。非传动端采用定位轴承 NJ 或 NUP 短圆柱轴承, 传动端采用 NU 轴承, 见图 2.3-80。下面介绍这段轴承的计算方法。

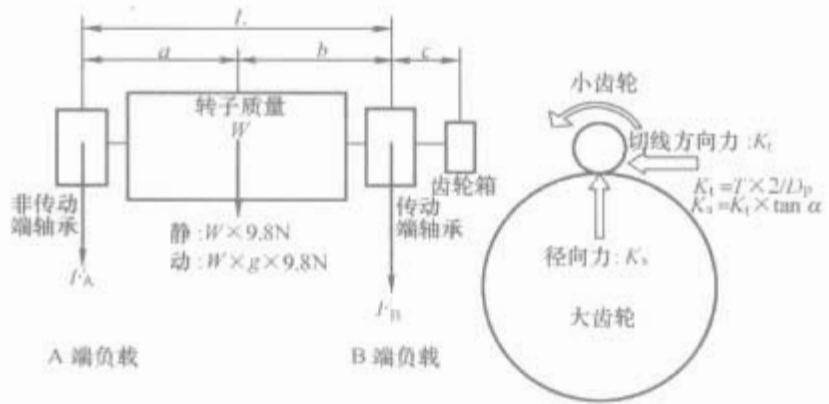


图 2.3-80 机车、动车模式
T—转矩; D_p —大齿轮节圆直径; α —压力角

1) 非传动端(A 端)轴承垂向负载, 分静负载和动负载分别计算。

①轴承垂向静负载。

转向 1 时 $F_{sA1} = 9.8Wb/L - K_t c/L$ (2.3-121)
 $K_t = 2T/D_p$ (2.3-122)

式中: c 为 B 端轴承中心到小齿轮中心的距离, m; K_t 为切向力, N; T 为转矩, N·m; D_p 为大齿轮直径, m。

转向 2 时 $F_{sA2} = 9.8Wb/L + K_t c/L$ (2.3-123)

②轴承垂向动负载。

转向 1 时 $F_{dA1G} = 9.8gWb/L - K_t c/L$ (2.3-124)
转向 2 时 $F_{dA2G} = 9.8gWb/L + K_t c/L$ (2.3-125)

式中: g 为动负载系数, 对车体底架承式 $g=3$, 对转向架架承式 $g=5$, 对抱轴式 $g=10$ 。

③轴承水平负载为

$F_{rA} = K_s c/L$ (2.3-126)
 $K_s = K_t \tan \alpha$ (2.3-127)

式中: K_s 为 A 端轴承水平力, N; α 为齿轮的压力角, (°)。

④轴承合成负载, 分静负载和动负载分别计算。

静负载:

转向 1 时 $F_{sA1H} = (F_{sA1}^2 + F_{rA}^2)^{0.5}$ (2.3-128)
转向 2 时 $F_{sA2H} = (F_{sA2}^2 + F_{rA}^2)^{0.5}$ (2.3-129)

动负载:

转向 1 时 $F_{dA1GH} = (F_{dA1G}^2 + F_{rA}^2)^{0.5}$ (2.3-130)
转向 2 时 $F_{dA2GH} = (F_{dA2G}^2 + F_{rA}^2)^{0.5}$ (2.3-131)

⑤平均负载

$F_A = [(1-r)/2 \times F_{sA1H}^p + (1-r)/2 \times F_{sA2H}^p + r/2 \times F_{dA1GH}^p + r/2 \times F_{dA2GH}^p]^{1/p}$ (2.3-132)

⑥轴承寿命 $L_{10} = (C_{rA}/F_A)^{1/p} \times 10^6$ (2.3-133)
走行距离寿命 $L_{sA} = \pi D_L / \mu L_{10}$ (2.3-134)

2) 传动端(B 端)轴承垂向负载, 分静负载和动负载分别计算。

①静负载。

转向 1 时 $F_{sB1} = 9.8Wb/L + K_t (c+L) / L$ (2.3-135)
转向 2 时 $F_{sB2} = 9.8Wb/L - K_t (c+L) / L$ (2.3-136)

②动负载。

转向 1 时 $F_{dB1G} = 9.8gWb/L + K_t (c+L) / L$ (2.3-137)

转向 2 时 $F_{dB2G} = 9.8gWb/L - K_t (c+L) / L$ (2.3-138)

③轴承水平负载

$F_{rB} = K_s (c+L) / L$ (2.3-139)

④轴承合成负载。分静负载和动负载分别计算。

静负载:

转向 1 时 $F_{sB1H} = (F_{sB1}^2 + F_{rB}^2)^{0.5}$ (2.3-140)
转向 2 时 $F_{sB2H} = (F_{sB2}^2 + F_{rB}^2)^{0.5}$ (2.3-141)

动负载:

转向 1 时 $F_{dB1GH} = (F_{dB1G}^2 + F_{rB}^2)^{0.5}$ (2.3-142)
转向 2 时 $F_{dB2GH} = (F_{dB2G}^2 + F_{rB}^2)^{0.5}$ (2.3-143)

⑤平均负载

$F_B = [(1-r)/2 \times F_{sB1H}^p + (1-r)/2 \times F_{sB2H}^p + r/2 \times F_{dB1GH}^p + r/2 \times F_{dB2GH}^p]^{1/p}$ (2.3-144)

⑥轴承寿命 $L_{10} = (C_{rB}/F_B)^{1/p} \times 10^6$ (2.3-145)
走行距离寿命 $L_s = \pi D_L / \mu L_{10}$ (2.3-146)

上述轴承寿命计算仅仅是在理想润滑条件下的粗略计算, 它与润滑材料的性质、轴承室的结构、轴承系统的清洁度和加油方法密切相关, 必须由试验和运行来验证。

3.1.4.3 润滑油和脂的选择

(1) 润滑油或脂的四大功能。

- 1) 在滚道和滚子表面形成保护膜, 防止轴承滚动接触面的磨损, 降低摩擦的阻力。
- 2) 冷却滚动面, 降低接触面的温度。
- 3) 防止轴承面锈蚀。
- 4) 润滑油可冲掉轴承内润滑层的杂质及异物, 从而降低轴承的磨损。有微修补功能的润滑剂可以对滚动面进行微量的修补, 使轴承内摩擦副的粗糙度大大降低, 轴承能长期保持充分润滑状态, 轴承的寿命可成倍增长。

为了保证轴承工作时, 轴承部件间的充分润滑, 润滑油或者润滑脂应该在滚子、滚道和保持架的摩擦副上形成高强度的油膜, 防止金属间的接触。在润滑脂或润滑油中加添加剂, 可以增强油膜强度, 减少滚动表面的磨损和锈蚀。接触面周围的润滑脂, 既要及时向轴承内部补充基油, 又不能使轴承内部空间的基油太多, 相互搅拌生成热量和摩擦产生的热量通过基油带走。润滑充分时, 滚子振动小; 若润滑不足, 滚子振动明显加大, 电动机还会出现周期性的或不规则的响声, 见图 2.3-81。

(2) 润滑油或脂中的成分。

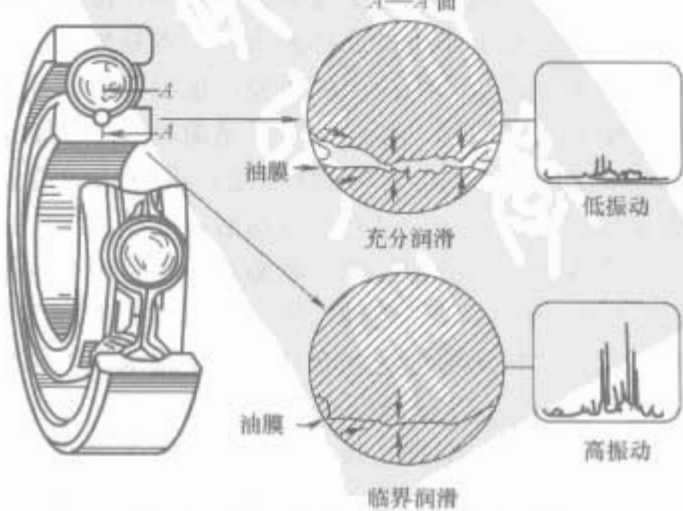


图 2.3-81 充分润滑与临界润滑

- 1) 添加剂。为了增强润滑效果，在润滑油中添加去油泥、抗氧化、防止锈蚀、耐高温、耐压、抗乳化、防起泡、微抛光和微修补的化学添加剂，约占总量的 5%，它使润滑油在金属表面形成高强度坚韧的油膜。
 - 2) 增稠基。润滑脂中的增稠基是在润滑油中加皂基混合后炼成，约占总量的 10%。皂基有钙基、铝基、钠基、钡基、锂基、铝复合基和锂复合基等。它们对润滑脂的机械稳定性、耐热性、高温油寿命、防水性和与其他油脂的相容性影响很大。
 - 3) 基油。有矿物油和合成油两大类。合成油使用在加油周期长、一般矿物油不能胜任的高温和高氧化的场合。常用的有烯聚合物、烷芳香烃、聚二醇、有机酯和有机硅等，约占总量 85%。
- (3) 轴承的润滑机理。轴承运转过程中的润滑，主要是润滑油或脂中基油和化学添加剂的物理和化学共同反应的结果。
- 1) 润滑脂的润滑机理。在润滑脂中，增稠基的作用是

将基油和化学添加剂吸附在润滑脂的“网架”中。试验表明，电动机旋转时，轴承中的基油向轴承室方向运动，不断顺着轴向扩散。轴承室中的基油向轴承内部补充基油，若轴承室结构或轴承内圈固定方式不合理，会造成基油运动路径的堵塞，轴承内部的基油补油不足，导致滚子和保持架和滚道面的润滑层破坏，造成金属间直接接触，发生金属间的磨损。局部轴承室结构不合理，也会妨碍轴承的补油，导致滚道面的局部磨损；补油或者加油不及时，轴承内部的基油会越来越少，润滑脂会发生化学反应后变质、变干、变硬；某些润滑脂吸附水分，润滑层在接触点附近产生高温，水分子在高温作用下汽化，进一步破坏润滑层，甚至使金属氧化和锈蚀。在电动机转动时的振动和噪声也越来越大，滚子、滚道和保持架一旦出现磨损，磨损下来的金属屑又导致摩擦的加剧，产生更多的热量，甚至使内、外圈和滚子表面发蓝。此时再不更换油脂，轴承将很快到达运行极限，大部分劣质油脂或不合理的轴承室造成轴承的破坏机理就在于此。异步牵引电动机轴承广泛采用脂润滑，见图 2.3-82。

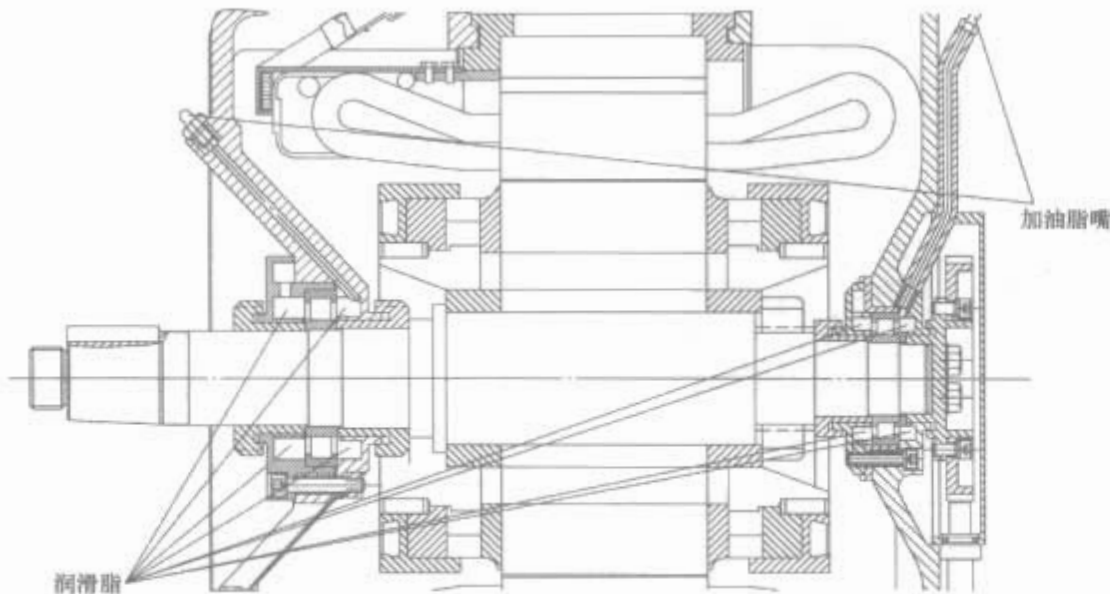


图 2.3-82 脂润滑异步牵引电动机

2) 润滑油的润滑机理。不少大功率高转速牵引电动机的传动端轴承采用油润滑，利用齿轮箱内润滑油的飞溅，把润滑油储存在齿轮箱顶部的油槽内，利用压力差把润滑油引入电动机传动端轴承室的贮油室内，经过该贮油室的沉淀和过滤，再把润滑油送入传动端的轴承进行润滑。因此，牵引电动机的油润滑轴承首先要求进入其内的润滑油中的有害杂质少、不能积碳。劣质润滑油会因为积碳造成油泥，堵住部

分进油孔，造成轴承润滑油路不畅，轴承缺油润滑。其次要求齿轮的磨损小，磨损形成的磨粒直径要非常小（小于 $1\mu\text{m}$ ），大于 $1.12\mu\text{m}$ 的磨粒会破坏润滑的油膜，造成轴承的摩擦副与磨粒间的磨损，影响轴承的润滑，因此，一定要采用不吸附水分的、微磨损的优质润滑油，最好是优质的合成油。典型的轴承油润滑异步牵引电动机见图 2.3-83。

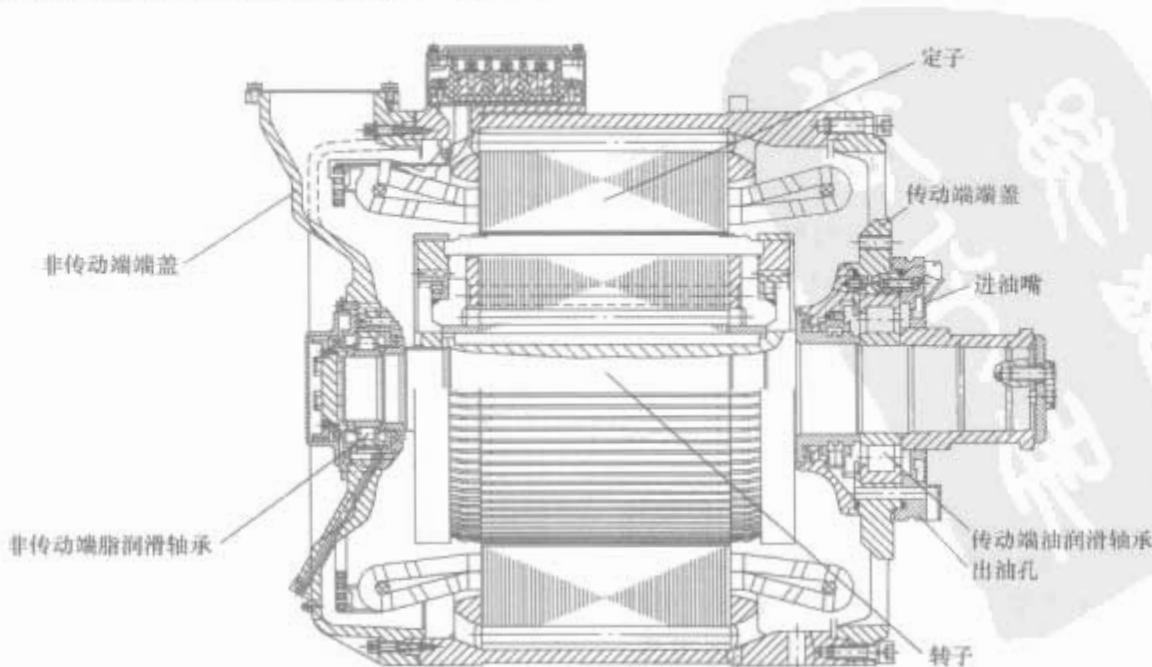


图 2.3-83 传动端轴承采用油润滑的异步牵引电动机

只要润滑油或润滑脂选择得当,如采用优质的、不吸附水分的、微磨损的长寿油,且符合工况要求,加油方法又得当和干净,轴承装配无初始刻痕,轴承寿命就会成倍延长。优质润滑油比一般润滑油的油寿高,加油周期甚至可延长4~5倍,最终,在综合经济效益上是很可观的。

3.1.4.4 牵引电动机的轴承试验

轴承的润滑是一门实用科学,需要认真地实际验证。我国自主开发的300km/h的高速动车组牵引电动机,在试验台(见图2.3-84)上已经完成了 200×10^4 km的耐久性试验,经过检查,仍可以继续使用,大大超过了牵引电动机轴承的原设计使用寿命。

牵引电动机的轴承试验有:

(1) 急加速试验。模拟机车或动车速度迅速变化,在规定时间内速度从0升高到最高速度或者从最高速度降至0,测量轴承的振动和内、外圈温度的变化。试验的目的是考核润滑层在加速过程中是否破坏,能否形成高强度的油膜。



图 2.3-84 300km/h 牵引电动机轴承试验台

(2) 温升试验(性能试验)。在每一种转速下测量轴承的振动,内、外圈温度的变化,绘制成振动加速度值,内、外圈温度,绝缘层外表的温度曲线。

(3) 耐久性试验。按轴承运行中最苛刻的条件进行耐久性试验。对牵引电动机,用运行千米数来表示。试验过程中测量轴承的振动,内、外圈的温度。通过试验确定在给定的加油周期内轴承的振动和温度能否稳定。试验后通过测量油脂内的铁和铜的含量确定轴承的磨损,可进一步确定加油周期,通过轴承尺寸的检查,滚道面的状态确定轴承的磨损和寿命。

3.1.4.5 轴承的电腐蚀

交流异步电动机的轴电流会造成轴承的电腐蚀,一般只要一端采用绝缘轴承就可以了。但是,由于逆变器谐波电压对两端轴承都会形成高次谐波电流通道,其电腐蚀的概率更高,因此,两端均需采用绝缘轴承。目前采用的绝缘轴承绝缘层一般在轴承外侧,有树脂和陶瓷两种。树脂绝缘轴承耐温性差,高温时容易变形;陶瓷绝缘轴承耐温性好,当轴承过热时也不至于出现外圈松动而导致故障加剧。因此,在重要场合应该使用陶瓷绝缘轴承。

3.2 同步牵引电动机

3.2.1 永磁同步牵引电动机

20世纪80年代以来,由于电力电子器件、电子控制技术的进步及高磁能级稀土永磁材料的出现,给电机带来了“革命”。永磁电动机由于有节能效果,体积和质量小,可靠性高等优点,在许多领域里有竞争能力,在国外发展很快,已形成规模生产。永磁同步电动机在牵引领域有很好的应用

前景。20世纪90年代以来,日本、德国、法国等相继开展了这方面的研发,已有产品在装车试用或小批量生产,功率为100~500kW,主要用于动力分散的电动车组。

永磁同步电动机与电励同步电动机在结构上的根本区别,是用装在转子上的永磁体代替了电励线圈。永磁体不需要电流励磁,转子没有损耗,提高了电机效率,并取消了集电环和电刷,使结构简化。由变频器供电的永磁同步电动机加上转子位置闭环控制系统,构成可调速系统。当反电动势波形和供电电流波形都是矩形波时,称为矩形波永磁同步电动机,其内部的电磁过程和直流电动机相似,可用类似的方法分析,因此又称为无刷直流电动机(BLDC)。当反电动势波形和供电电流波形都是正弦时,称为正弦波永磁同步电动机(PMSM),它与电励同步电动机有相似的内部电磁关系,可以用双反应理论来研究。

永磁同步电动机的转矩表达式为

$$T_m = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2.3-147)$$

式中: ψ_f 为永磁体产生的交链磁通的最大值; L_d 为d轴电感; L_q 为q轴电感; i_d 为d轴电流; i_q 为q轴电流; p 为极对数。

由式(2.3-147)可看出转矩有2个分量:一个分量是由永磁体的磁场与定子旋转磁场同步运行产生的,称为永磁转矩;另一个分量是由转子磁路的不对称产生的,称为磁阻转矩。

永磁同步电动机的电压表达式为

$$U = \omega \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2} \quad (2.3-148)$$

永磁体产生的 ψ_f 无法调节,当电动机电压到达逆变器能输出的电压极限时,只有通过调节定子电流,即增加定子直轴的去磁电流分量,使转速升高;与此同时,应减小交轴电流,以保证电枢电流不超过电流极限值。

ψ_f 的选择受最高转速时空载感应电压的限制,该电压的峰值不能超过逆变器的直流输入电压,即

$$\psi_f = \frac{E_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{E_d}{\sqrt{2} \omega_{\text{max}}} \quad (2.3-149)$$

电动机在高速范围的功率发挥取决于 L_d 的值,增大 L_d 有利于高速工况的功率发挥,是较理想的途径。减少 ψ_f 是提高高速范围功率的另一途径,但同时使低速范围的转矩减小,电动机的瞬态性能变差,且 ψ_f 过小可使磁阻转矩的比例增大,不利于充分利用永磁体磁能。虽然提高 U_{lim} 、 I_{lim} 也会改善高速时的功率发挥,但均使逆变器容量增加,系统成本增加。

几种永磁同步电动机转子的典型结构如图2.3-85所示,图2.3-85(a)和(b)为表面式,为防止高速时永磁体飞散,除永磁体黏结在转子表面外,在转子外再覆盖以非磁性绑带。其中,图2.3-85(a)所示结构为表面凸出

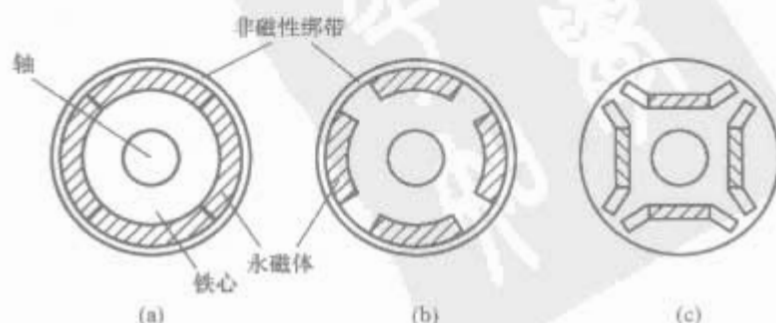


图 2.3-85 永磁同步电动机转子的典型结构
(a) 表面凸出式; (b) 表面嵌入式; (c) 内置径向式

式， $L_d=L_q$ ，基本不产生磁阻力矩；图 2.3-85 (b) 所示结构为表面嵌入式，有凸极效应， $L_d<L_q$ ，能产生磁阻力矩；图 2.3-85 (c)所示结构为内置径向式结构，有凸极， $L_d<L_q$ ，能产生磁阻力矩。表面凸出式漏磁系数低，磁铁利用充分，适用于转速较低要求转矩大的场合。内置径向式漏磁系数比表面凸出式大，但由于以下特点，在要求弱磁扩速范围宽且要求高速运行的永磁同步电动机中，通常都采用该结构。

(1) 同样的永磁体磁化方向长度和气隙长度下，内置径向式比表面凸出式的直轴同步电感大，有利于恒功范围扩展。

(2) 内置径向式永磁体的抗不可逆退磁能力比表面凸出式的大。

(3) 内置径向式转子的磁阻转矩可被充分利用，永磁磁链可设计较低，有利于恒功范围扩大。

(4) 内置径向式转子的机械强度更高，更适合高速运转。

3.2.2 永磁同步电动机在机车或动车上的应用

3.2.2.1 作为直接驱动牵引电动机

所谓直接驱动就是将电动机套在轮轴上，电动机的转矩不经齿轮直接传递到轮对上。这种驱动方式与目前采用的齿轮传动方式比较，有以下优点：

(1) 消除了由齿轮传动引起的噪声、漏油、振动等一系列问题，减少了维护工作并提高了效率。

(2) 为采用独立车轮方式提供了可能，不容易产生蛇行，降低了通过曲线时产生的噪声。

(3) 可采用直径较小的车轮（910~600mm），有利于降低车体地板高度，从而能设置双层电动车辆的通道。

直接驱动的这种想法早就有了。但由于电动机转速低、转矩大，使其体积过分庞大，无法在机车车辆的有限空间内布置而难以实现。高性能永磁材料的开发为这种想法提供了可能。与传统的直流电动机和异步电动机相比，永磁同步电动机可以采用较多的极对数，其转矩密度高，因而体积和质量大幅减小，为直接驱动的实现提供了可能。

日本已开发出 80~200kW 径向磁场外转子永磁电动机作为下一代牵引电动机，将用于 NEXT250 高速窄轨列车、变轨距电动车组 GCT 及 AC 通勤电动车组等车辆上。相同规格的 80kW、1480r/min 的异步牵引电动机与永磁同步电动机的对比见表 2.3-29。

表 2.3-29 永磁电动机与异步电动机的对比

类型	外形尺寸 (mm)	质量 (kg)	效率 (%)	功率因数
永磁电动机	φ400×485	260	93	0.91
异步电动机	φ400×585	395	90	0.76

由此可见，永磁电动机减重和节能的效果明显。

另外，德国铁路股份公司将购置下一代的城间高速动车组 ICE4，其走行部将采用独立车轮，由无齿轮箱的轻型大功率电动机（500kW）驱动。由不伦瑞克（Braunschweig）技术大学设计的无源转子式横向磁通永磁电动机和 Starn-beng 磁性电机公司设计的有源转子式永磁同步电动机两种方案，在实验室试验后装在 ICE3 车上，在 $v_m=330\text{km/h}$ 的条件下进行试验。它们与 ICE3 上使用的异步牵引电动机的主要参数对比见表 2.3-30 所示。图 2.3-86 所示为 ICE3 的有源转子式永磁同步电动机直接驱动系统结构示意图。

表 2.3-30 有源转子和无源转子永磁同步电动机与异步电动机的对比

电动机型式	异步电动机	有源转子永磁同步电动机	无源转子横向磁通永磁电动机
额定功率 (kW)	500	500	500
传动比	1 : 2.79	—	—
电动机起动转矩 (kN·m)	3.2	9	9
最高转速 (r/min)	5880	2300	2300
电动机质量 (kg)	750	800	400
齿轮箱质量 (kg)	300	—	—
连接器质量 (kg)	20+30	30	50
电动机最大效率 (%)	94.5	94.5	96.5
传动效率 (%)	97	—	—
总效率 (%)	91.5	94.5	96.5
电动机外径 (mm)	560	610	700
电动机轴向长度 (mm)	600	650	380
齿轮箱轴向长度 (mm)	100	—	—
空心轴内径 (mm)	—	200	150

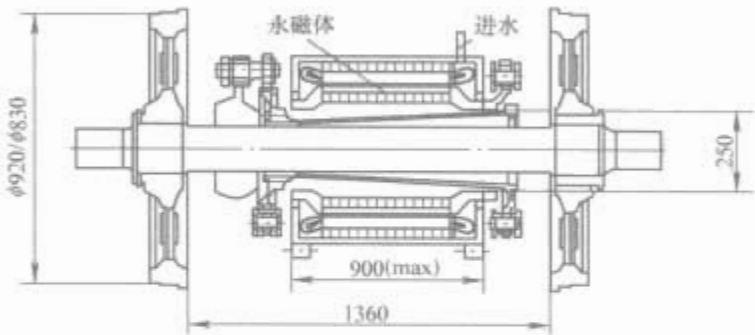


图 2.3-86 有源转子式永磁同步电动机直接驱动系统结构示意图

法国阿尔斯通公司开发了用于单层 AGV 高速列车及轻轨车辆 LRV 的永磁同步直接驱动电动机作为未来牵引驱动先进技术的一部分。这些电动机的主要参数见表 2.3-31。

表 2.3-31 阿尔斯通公司永磁同步电动机主要参数

车 型	LRV	AGV
最大转速 (r/min)	3600	4500
牵引功率 (kW)	120	720
制动功率 (kW)	240	720
连续功率 (kW)	100	720
直流接触网 (V)	600	3000
极数	8	12
效率 (%)	96	97
机座尺寸 (mm×mm)	380×420	650 (直径)
机座长度 (mm)	525	650
总质量 (kg)	285	730

意大利菲亚特集团公司下的 PARIZZI，为电车及橡胶轮车辆生产的永磁同步电动机，其最大功率为 65kW，连续功率为 45kW，起动转矩为 2400N·m，质量为 150kg。新一代车辆的每个轮上都装有一台永磁同步电动机，在降低噪声，提高效率的同时，还减少磨损。另外，还为动车组开发

了功率达 200kW 的永磁同步电动机，图 2.3-87 为轻轨用直接驱动轮毂式永磁同步电动机的结构示意图。

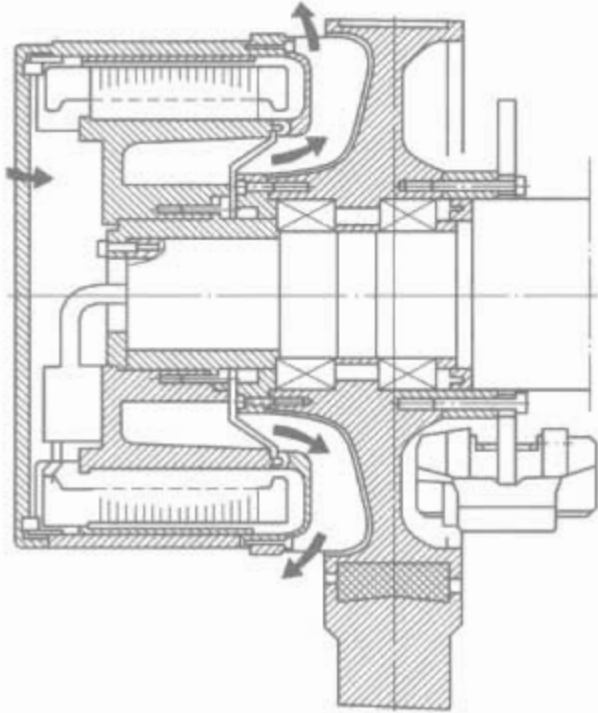


图 2.3-87 轻轨用直接驱动轮毂式永磁同步电动机的结构示意图

3.2.2.2 作为全封闭牵引电动机

牵引电动机若采用传统的通风方式，冷却风中的灰尘、铁粉将污染电动机内部，因而必须定期解体电动机，进行清扫。如果采取全封闭结构，就不需要对电动机进行定期解体清扫。同时，电动机内部的噪声被隔离，可以实现低噪声。但全封闭后电动机的冷却能力变差，特别是转子的冷却。为了不增加电动机的体积和质量，必须采用转子发热较少的电动机。永磁电动机自然成了理想的选择。日本开发的全封闭永磁电动机采用自循环风冷方式。该电动机与相同规格的异步牵引电动机的性能对比见表 2.3-32。对车地板下牵引电动机附近的噪声进行了测量，在速度为 64km/h 时噪声降低 14dB，效果明显。德国的全封闭牵引电动机，其定子采用水冷方式。

表 2.3-32 全封闭永磁电动机与异步牵引电动对比

电动机类型	永磁同步电动机		异步电动机
冷却方式	全封闭自冷		自通风
功率 (kW)	140	200	200
电压 (V)	1000	1100	1100
电流 (A)	108	148	130
转速 (r/min)	2550	2550	2535
效率 (%)	97	97	92
轴承润滑	油脂润滑		油脂润滑
质量 (kg)	570		595

3.2.3 永磁同步电动机的有关问题

- (1) 因为是同步电动机，必须由与电动机旋转同步的交流电源供电，因而要采用 1 台逆变器向 1 台电动机供电的独立控制方式，而且每台电动机都需要一个高分辨率的位置传感器。
- (2) 即使没有外部供电，永磁体也有与定子绕组的交链磁通，惰行时电动机端子将产生空载感应电压，由此可能带来以下问题：
- 1) 逆变器出现相间短路等故障时，电动机将向故障点供电，产生短路电流，可能使故障扩大。

- 2) 空载感应电压的峰值若超过逆变器元件的耐压，就会损坏元件。
- 3) 如果空载感应电压的峰值高于逆变器直流侧电压，则惰行时因与逆变器开关元件反并联的二极管整流作用，会产生非正常再生制动。
- 4) 当永磁同步电动机的定子发生层间短路时，虽用负载接触器将其与逆变器断开，但回送时永磁体的磁通还能产生电动势，由此在层间短路的线圈上产生短路电流。
- 对 1) 而言，需要在电动机和逆变器之间设置负载接触器，故障时将它们断开。对 2) 而言，可以采取在电动机中流过削弱磁场电流的办法，使惰行时上升的电压不太高，或者用负载接触器隔离牵引电动机。最现实的办法是在设计时使磁铁产生的交链磁通控制在一定值，由此而降低的永磁转矩由磁阻转矩来补偿，这对 3) 也是有效的。对 4) 而言，研究表明，这种故障是罕见的，但也是严重的，要求回送时速度保持在一定值以下，其损伤才不会扩大。

3.2.4 展望

国外在永磁同步电动机驱动系统上经过 10 余年的研究开发，在技术上已日趋成熟。目前已进入实用阶段。首先已成功用于动车及轻轨车辆上。该系统有节能、改善环境条件、降低运用费用等特点，具有良好的应用前景。我国在该领域的开发工作还刚起步，需要加大力度，尽快赶上。

3.3 直（脉）流牵引电动机

3.3.1 应用领域

直（脉）流牵引电动机主要的应用领域及规格如下：

- (1) 干线电力机车。用于货运机车，每轴电动机功率达 700~800kW；客运机车达 900~1200kW。
- (2) 干线内燃机车。受发动机功率的限制，每轴电动机功率为 400~500kW。
- (3) 干线电动车组。分动力集中和动力分散，前者电动机功率达 500~1200kW，后者为 150~300kW。
- (4) 地铁车辆。视动车和拖车的比例不同，电动机功率为 100~180kW。
- (5) 工矿电力机车。电动机功率为 50~200kW。

3.3.2 分类

3.3.2.1 悬挂及传动方式

根据电动机悬挂及传动方式不同，牵引电动机有不同的机座设计和安装结构设计。

最高速度小于或等于 140km/h 的机车目前仍广泛采用抱轴式悬挂（简称半悬挂）。牵引电动机的一端借抱轴承支持在轮轴上，另一端鼻部借弹性元件挂于转向架上，见图 2.3-88。在电枢轴上装有小齿轮，在轮轴上装有大齿轮，是

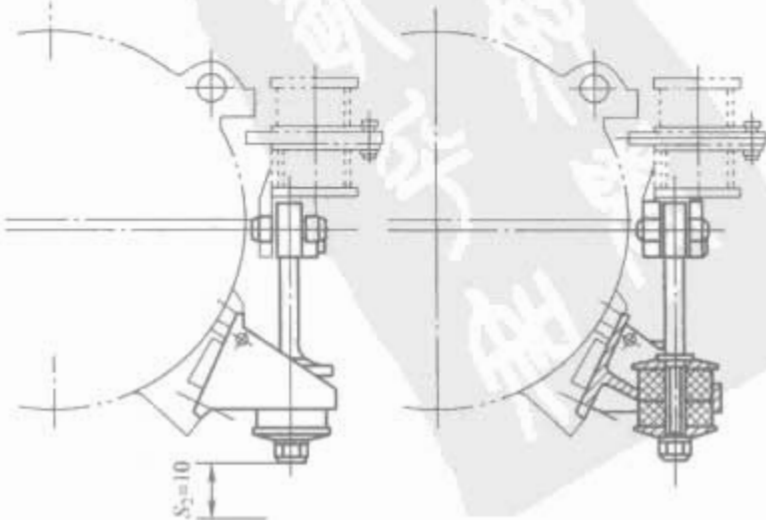


图 2.3-88 鼻部悬挂示意

一种采用直接啮合传递转矩的办法。这种悬挂和传动方式构造简单，分解组装容易，但电动机质量的一半属簧下质量，而且由钢轨产生的冲击和振动直接传给牵引电动机和传动装置，将影响这些装置的运行可靠性。传动方式多数为单边刚性直齿，为减小冲击和振动也采用结构较复杂的弹性齿轮。早期的干线电力机车采用双边刚性斜齿，以降低对齿轮的要求。

在地铁车辆以及最高速度小于或等于 160km/h 的机车和动车组上，采取将牵引电动机装在转向架构架上的所谓转向架架承式悬挂。在电枢轴与齿轮装置间装有弹性联轴节。这样，不仅能减小簧下质量，还减小了牵引电动机所承受的冲击和振动。对机车而言，传动方式还分为轮对空心轴传动和电枢空心轴传动。前者簧下质量最小，适合 160km/h 以上高速，结构虽复杂，但没有太大难点，电动机结构上变化不大，应用较多。后者的齿轮箱仍为半悬挂，簧下质量比前者大，适合 160km/h 及以下，电动机结构变化较大，中心距比前者小，传动比可较大，传动方式以独立（单轴）驱动为主流，也有一台转向架用一台电动机的组合驱动方式。

在 200km/h 及以上速度的电力机车和动力车上，采用牵引电动机装在车体底架上的架承式悬挂，传动方式用万向节传动；或将电动机一端吊装在车体底架上，另一端安装在转向架构架上的架承式悬挂，传动方式用空心轴六连杆弹性传动，适合于高速运行有良好的动力学性能和牵引电动机有良好的振动环境。

3.3.2.2 电源形式

由单相交流接触网供电的干线电力机车和干线电动车组，由于供给电动机的电流为脉流，除直流成分外还有 20%~30%、100Hz 的交流成分，需采取一定的措施来改善脉流换向，此时，称为脉流牵引电动机。

由直流接触网供电的地铁车辆、工矿电力机车以及干线内燃机车由车载三相交流发电机经整流后供给电动机的电流为直流（交流成分小于或等于 10%），此时，称为直流牵引电动机。

3.3.2.3 励磁方式

采用串励的电动机称为串励电动机，由于其速率特性软，符合机车车辆牵引要求，电动机并联工作时的负荷分配较均匀，而且具有磁极线圈匝数少、耐用、散热好等优点，是牵引电动机最普遍使用的方式。其主要缺点是空转时电枢可能飞速，造成机械损伤，黏着利用较差。采用他励的电动机称为他励电动机，各项特性则与之相反，速率特性硬，防空转性能和黏着利用好。若利用现代电子技术，对电枢回路和励磁回路分别控制，以达到负载分配均匀，特性与串励相近的特点，更适合牵引要求，但这种方式对系统控制要求较高。采用串、他励结合的电动机为复励电动机，其特性介于前两者之间，其控制比他励电动机简单，也不需要串励电动机的磁场削弱电阻，可平滑调节磁场。其励磁安匝中，串励占 30%~40%，他励占 60%~70%。但电动机结构稍复杂，定子空间要加大。

3.3.2.4 通风方式

干线机车用大功率牵引电动机大多采用强迫风冷，冷却空气一般由换向器室进入，使换向器得到较好的冷却，最后由非换向器端排出。电枢铁心设有轴向通风孔。少数电动机采用相反的途径，即由非换向器端进风，以避免电刷碳粉进入电动机，并使温升较高的后端冷却改善。电动车组和地铁车辆用功率较小的牵引电动机，采用自通风方式，风扇装在非换向器端。个别大功率牵引电动机也采用自通风方式。

现代牵引电动机在连续工况下每千瓦损耗所需的风量，对强迫通风电动机为 0.15~0.25m³/(min·kW)，对自通风电动机为 0.1~0.15m³/(min·kW)。

3.3.3 现状及展望

3.3.3.1 现状

电力机车用脉流牵引电动机是各应用领域中功率最大、技术难度最高、最具代表性的产品。目前，国产货运电力机车用脉流牵引电动机的轴功率 P_N 已达 800kW（持续制），客运电力机车用的电动机达 900kW。为 200km/h 列车的动力车设计的电动机，其轴功率已达 1000kW。与此同时，电动机的恒功率调速范围由早期的 1.35~1.45 扩大至 1.6~1.7。恒功速比 K_{PV} 的提高，表明机车在高速时仍保持满功率输出，能更好地满足多拉快跑的运输要求。 $K_{PV} P_N$ 代表电动机的设计功率，该值在逐年增长，但电动机的体积及相应的质量 G 并没有增加，反而稍有降低。这意味着代表电动机水平的一个技术经济指标 $g = K_{PV} P_N / G$ ——电动机比功率，在逐年增长。表 2.3-33 列出有代表性的国产脉流牵引电动机的有关数据。

表 2.3-33 国产脉流牵引电动机的主要指标

型号	设计年代	所属机车	持续制额定功率 (kW)	恒功速比	质量 (kg)	比功率 (kW/kg)
ZD103	1975	SS ₃	720	1.38	3960	0.25
ZD105	1983	SS ₄	800	1.43	3960	0.288
ZD111	1991	SS ₇	800	1.67	3680	0.363
ZD114	1993	SS _{6B}	800	1.66	4010	0.33
ZD115	1995	SS ₈	900	1.68	3550	0.41
ZD118	1998	200km/h 动车	1000	1.585	3550	0.45

与此同时，电动机的可靠性也在不断提高。早期电动机的落修率为 3.5~4（台·次）/10×10⁴km，最近已下降到 0.6~0.8（台·次）/10×10⁴km。用于 SS₈ 客运电力机车的 ZD115 型脉流牵引电动机，该值已低于 0.1（台·次）/10×10⁴km，达到国外同类产品的先进水平。

3.3.3.2 技术进步

- (1) 材料方面。材料方面的技术进步体现在：
- 1) 绝缘材料采用以薄膜、云母为基础，耐热等级为 H 级或 C 级的绝缘系统，绝缘厚度仅为早期电动机的 50%，而且采用了无溶剂浸渍漆。
 - 2) 采用低损耗冷轧硅钢板，叠压系数由 0.93 提高至 0.97。
 - (2) 结构方面。采取了以下措施：
 - 1) 采用全叠片多边形机座代替以前的圆形铸造机座，使电动机在脉流供电和暂态过程的换向得到根本性的改善。
 - 2) 切实实现定子绝缘一体化，连线接头由螺栓连接改为钎焊连接，所有连线加强固定。
 - 3) 改进刷架系统的固定及压指弹簧结构。
 - 4) 在货运机车方面仍采用抱轴式悬挂，但采用了单边传动代替早期的双边传动方式，且用滚动抱轴承代替了传统的滑动轴承；在客运机车方面采用轮对空心轴架承式悬挂弹性传动方式，使电动机承受的振动和冲击显著减少，同时也减小了机车对线路的动力作用。
 - (3) 工艺方面。在总结以往经验教训及消化吸收国外先进工艺技术的基础上，主要采取了以下措施：
 - 1) 绝缘系统采用真空压力浸渍工艺和先进的真空压力浸渍设备，提高了浸渍质量。采用旋转烘焙工艺，防止无溶

- 剂漆在烘焙过程中的流失。
- 2) 换向器升高片与电枢导线间已普遍采用钨极惰性气体保护焊 (TIG)。
- 3) 电枢绕组端部采用钢丝预绑, 采用有捻网状玻璃丝无纬带, 提高了绑扎力, 保证绕组端部的坚固性。
- 4) 定子连线与线圈引出头之间用低温银焊代替螺栓连接。
- 5) 强化换向器片装、器装及动力成型工艺, 确保换向器高速时的稳定性。
- 6) 改善电动机制作现场的清洁度, 对线圈制作、嵌线及轴承组装工地建立了隔离净化区。
- 7) 采用高精度数字加工中心, 保证零部件的加工精度。
- (4) 设计方法方面。已普遍采用 CAD 设计, 编制了专用的设计软件, 扩大了优选范围, 加快了设计速度。采用有限元分析法对电磁场进行精确计算和分析, 利用计算机这一强有力的手段, 已有可能由以往经验设计进入分析设计阶段, 使设计更精确、更合理, 电动机性能更好, 体积更小。

3.3.3.3 展望

近年来, 由于交流传动机车的进展, 以及要求 10 年内由交直传动向交流传动转换, 我国脉流牵引电动机的退出似乎已进入倒计时阶段, 但目前在线路上大量使用的还有较早期的脉流电动机, 作为维修所用的配件电动机仍然有不小的市场, 而且这种状态还会持续相当一段时间。针对这一情况, 在脉流牵引电动机方面还面临着以下任务:

- (1) 对老型电力机车所采用牵引电动机的技术提升, 如 SS₃、SS₄ 型电力机车的牵引电动机应从设计工艺上采取改进措施, 提高可靠性和全寿命周期质量。
- (2) 正在运用的早期电动机产品落修率还比较高, 应加强维护保养的新工艺措施, 加强对修理工作的质量程序管理, 通过改进维修方法提高其可靠性和耐久性。
- (3) 由于价格的优势和技术上的成熟, 脉流牵引电动机仍有较强的竞争能力和一定的市场, 应根据市场的需要, 开发相应的新产品, 但要重视产品的系列化、通用化和标准化。

3.3.4 参数的选择及确定

3.3.4.1 电气参数

(1) 额定功率 P_N 。 P_N 由机车和动车的额定牵引力和额定速度确定。牵引电动机一般使用连续定额和小时定额。如无特殊规定, 连续定额为制造厂的保证定额, 小时定额是在型式试验时确定的, 作为出厂试验的考核依据。额定功率为

$$P_N = F_N v_N / (3600 \eta_c m) \tag{2.3-150}$$

式中: F_N 为机车和动车的额定牵引力, N; v_N 为机车和动车的额定速度, km/h; η_c 为齿轮传动效率, 一般取 0.975; m 为牵引电动机台数。

(2) 额定电压 U_N 。由接触网经变压器、变流器供电的脉流牵引电动机或自备电源供电的直流牵引电动机的额定端电压, 可以按电动机及车上配套设备的最佳参数进行选择。但由接触网直接供电的, 其端电压由网压及串联电动机的台数确定。

(3) 额定电流 I_N 为

$$I_N = P_N \times 10^3 / (U_N \eta_d) \tag{2.3-151}$$

式中: η_d 为牵引电动机效率。

(4) 额定转速 n_N 为

$$n_N = 5.3 \mu v_N / D \tag{2.3-152}$$

式中: μ 为齿轮传动比; D 为动轮半磨损状态的直径, m。

当牵引电动机在试验台上以额定工况运转时, 其绕组和换向器温升不应超过表 2.3-34 给出的限制值。为了减小电动机的体积和质量, 这些限制值比一般电动机高。

表 2.3-34 牵引电动机的温升限制值① K

部件名称	测量方法	绝缘等级			
		B	F	H	200
定子绕组	电阻法	130	155	180	200
旋转绕组	电阻法	120	140	160	180
换向器	电温度计法	120	120	120	120

① 基准温度为 25℃。

(5) 特性参数。直流串励牵引电动机在牵引工况的特性曲线包括转速 n 、转矩 T 、效率 η 与电流 I 的关系曲线, 应在不同励磁 β 下绘出, 如图 2.3-76 (a) 所示; 在制动工况下的特性曲线包括制动电流 I 、转矩 T 、效率 η 与转速 n 的关系曲线, 如图 2.3-76 (b) 所示。

为了扩大电动机的恒功率范围, 通常采用削弱磁场或调节电压的办法。恒功率调压比为

$$K_{PV} = n_{PV} / n_N = K_U^2 / (\beta_{min} K_S) \tag{2.3-153}$$
$$K_S = F_0 / F_\delta$$

式中: n_{PV} 为电动机恒功率最大转速, r/min; K_U 为调压比; β_{min} 为最小励磁率; K_S 为磁路饱和系数; F_0 为空载磁动势, A; F_δ 为气隙磁动势, A。

由此可见, 为了扩大恒功范围, 牵引电动机应取较低的 K_S 、 β_{min} 和较高的 K_U , 但要受高速工况下的换向条件限制。

现代相控电力机车牵引电动机 $K_U = 1 \sim 1.1$ 、 $K_S = 1.4 \sim 1.7$ 、 $\beta_{min} = 37\% \sim 50\%$, $K_{PV} = 1.4 \sim 1.7$; 内燃机车牵引电动机 $K_U = 1.4 \sim 1.7$ 、 $K_S = 1.6 \sim 2$ 、 $\beta_{min} = 45\% \sim 55\%$, $K_{PV} = 3 \sim 4$ 。

3.3.4.2 机械参数

(1) 传动比 i 。为使电动机体积和质量小, 应尽量选用较大的其计算式为 μ

$$\mu = Z_1 / Z_2 = D_Z / d_z \tag{2.3-154}$$

式中: Z_1 为大齿轮齿数; Z_2 为小齿轮齿数; D_Z 为大齿轮节圆直径; d_z 为小齿轮节圆直径。

通常, 干线货运电力、内燃机车的 $\mu = 4.1 \sim 4.6$, 地铁车辆的 $\mu = 5.5 \sim 6.5$ 。

(2) 极数。脉流牵引电动机的额定电压可以由设计者选择。通常认为, 电压和电流值相近, 即所谓“一欧姆”电机是比较理想的, 功率为 800~900kW 的脉流电动机, 其额定电压一般为 800~1000V, 并采用 6 极。功率更大时采用 8 极。功率较小的牵引电动机和 1500V 高压电动机, 一般采用结构简单的 4 极。

(3) 电枢铁心直径和长度。电动机的横向尺寸受动轮直径或齿轮中心距的限制。例如, 抱轴式电动机是目前电力、内燃机车应用最多的一种形式, 其电动机最大外径 D_s 可用下式近似表示, 即

$$D_s = 2(C - d_0 / 2) \tag{2.3-155}$$

式中: C 为齿轮中心距, mm; d_0 为动轮车轴直径, mm。

因电枢直径 D_a 通常为机座外径的 2/3, 最大可能的电枢直径为:

1) 主极按水平—垂直布置的 4 极电动机

$$D_a \leq 1.32(C - d_0 / 2) \tag{2.3-156}$$

2) 6 极电动机

$$D_a \leq 1.38(C - d_0 / 2) \tag{2.3-157}$$

若为架承式、万向联轴节传动的电动机，则

$$D_a \leq 1.34(C - d_0/2 - 20) \quad (2.3-158)$$

表 2.3-35 为抱轴式电动机在不同动轮直径时推荐的最大电枢直径和最大换向器直径。

表 2.3-35 抱轴式电动机在不同动轮直径时的
最大电枢直径和最大换向器直径

动轮直径	最大电枢直径 D_k	最大换向器直径 D_a
840	330	250
915	380	300
1067	520	430
1250	710	590

换向器直径 D_k 与电枢直径之比通常为

$$D_k/D_a = 0.75 \sim 0.85 \quad (2.3-159)$$

电枢铁心长度 L_a 取决于轨距、传动方式、电动机极数和对地电压等因素。对于抱轴式 4 极电动机，电枢直径为 400~650mm，且没有内装风扇的情况，表 2.3-36 给出的是电枢铁心长度的初选值。

表 2.3-36 电枢铁心长度初选值

轨 距	对地电压 (V)		
	750	1500	3000
1000	300	265	200
1067	350	315	250
1435	430	405	380

以上初选的电枢铁心直径和长度值需在电磁方案计算后绘出纵横剖面布置图时再行调整。

3.3.5 换向问题

3.3.5.1 牵引电动机的换向特点及改善直流换向的办法

换向是直流电动机的一个特殊问题。牵引电动机在换向方面的困难比一般工业用直流电动机要大得多，主要因为：

- (1) 各项换向指标接近限值，尤其是大功率牵引电动机。
- (2) 经常发生从空载至过载的大范围内负载变化，不利于换向器表面膜的形成。
- (3) 在坡道上起动重载列车时，若起动时间长，容易造成所谓“静止烧伤”，在换向器表面形成等节距的浅平斑或烧痕。
- (4) 承受运行时的强烈振动和冲击。

改善直流换向的办法：

- (1) 选择最佳的换向极靴形状，仔细调整换向极气隙。
- (2) 加强刷架系统的刚度，并固定牢靠。
- (3) 采用较厚的片间云母板。
- (4) 选用合适的电刷牌号、结构型式及电刷压力。
- (5) 刷杆及换向器前端用聚四氟乙烯套保护。
- (6) 必要时在刷盒与机座间设置放电间隙。
- (7) 附极绕组及补偿绕组在电路上接在电枢之后的接地侧。

措施 (5)、(6) 和 (7) 是为了万一产生环火，尽量减少环火的损害，属预后措施。

3.3.5.2 脉流下换向的特点及改善脉流换向的办法

脉流牵引电动机的电流纹波系数达 20%~30%，将带来脉流换向问题。在它的换向元件中，除存在直流电抗电动势和直流换向电动势外，由于电流交流分量和磁通交变分量的作用，还引起以下 3 种交流电动势：

- (1) 电枢电流交流分量引起的交流电抗电动势。
- (2) 由换向磁通交变分量引起的交流换向电动势。
- (3) 由主磁通交变分量引起的交流变压器电动势。

由于机座整体磁轭涡流的影响，使换向磁通交变分量减小，而且滞后于电流交流分量，从而在换向元件中产生较大的交流剩余电动势，最终造成脉流牵引电动机换向更加困难。

改善脉流换向的办法：

- (1) 主极绕组并联 95%~96% 的固定分路，磁场削弱时采用感应分路。
- (2) 在大功率、深度削弱磁场的情况下采用补偿绕组。
- (3) 采用部分叠片或全叠片机座和叠片换向极。
- (4) 设置较大的换向极第 2 气隙。

3.3.6 换向器和刷握装置

3.3.6.1 对换向器的要求

换向器及刷握装置是直（脉）流牵引电动机特有的关键部件，二者之间的稳定接触是良好换向条件的基本保证。其中，换向器在各种运行条件下都应保持其圆柱面。现代直（脉）流牵引电动机的换向器最大圆周速度高达 50~55m/s，对其圆周表面轮廓提出了很高的要求：

- (1) 跳动量小于或等于 0.03mm（当 $D_k < 400\text{mm}$ ）；小于或等于 0.04mm（当 $D_k = 400 \sim 800\text{mm}$ ）；小于或等于 0.06（当 $D_k \geq 800\text{mm}$ ）。
- (2) 相邻片的落差小于或等于 0.0025mm。换向器表面粗糙度推荐为 0.8~1.2 μm 。表面粗糙度过高（大于 2 μm ），电刷与换向器之间的摩擦因数将增加，导致电刷颤振；表面粗糙度过低（小于 0.2 μm ），电刷磨损加快。

3.3.6.2 换向器表面薄膜

正常情况下，换向器的电刷滑动面上将形成一层均匀、光亮的表面薄膜。该薄膜由 2 个主要成分组成：在铜表面覆盖着一层氧化亚铜薄膜；在氧化膜上面，又有一层由非常小的，有点黏性的颗粒所构成的碳附着物。其中，氧化膜对接触电阻、电流分布及换向产生影响；而碳附着物在吸收空气中的水分之后将产生润滑作用，使电刷和换向器之间的磨损和摩擦减小，电刷运行稳定。在电动机运行过程中，一方面，氧化膜在导电过程或摩擦的作用下被破坏，同时又在氧化的作用下重新形成；另一方面，由正电刷逸出的碳微粒堆积在氧化膜上，又由负电刷将它们清除。当两个相反的过程动态平衡时，一个稳定的、厚度适度的薄膜就均匀地出现在所有换向片的表面上。这种表面薄膜的存在，是电动机和电刷二者的运行都令人满意的标志。薄膜的颜色受许多因素的影响，一般呈现褐色至淡黑色。关于理想的薄膜颜色仍有争议，但从运用的角度来看，只要薄膜是均匀、光亮、稳定的，而且电刷运行令人满意，则薄膜颜色的深浅就不那么重要了。当电动机内部出现故障或正常的运行条件被破坏时，薄膜的形态就会发生变化。在日常检查中，及时察觉这些变化，有助于确定故障的原因，防止换向器表面损伤程度的扩大。

3.3.6.3 换向器结构及材料

换向器仍以拱式为最主要的型式。普遍采用银铜梯排，含银 0.08%~0.15%，软化点提高至 300℃ 以上（电解铜为 180℃），增加其耐磨性。片间及 V 形环绝缘材料传统用虫胶云母板，在 H、C 级绝缘的牵引电动机上已采用合成树脂或无机黏结剂黏合的云母板。国产牵引电动机已推广使用合成树脂黏结剂黏合的粉云母板，其厚度偏差小，能较好地满足换向器圆周等分的要求。V 形环绝缘材料仍以虫胶云母板

为主,但对虫胶加入少量合成树脂予以改性。换向器用螺栓紧固仍为较普遍的形式。该螺栓的设计十分关键,其非螺纹的自由长度应与换向器工作面长度相当,而截面稍小,螺栓在用恒力矩扳手拧紧时能产生一定的弹性伸长。这对减小铜梯排鸽尾部分的热应力及免除在运用中换向器的松动很有帮助,有利于提高换向器的热稳定性和力稳定性。图 2.3-89 所示为这种换向器的典型结构。

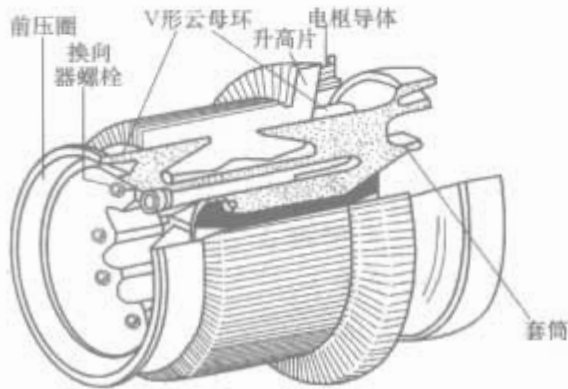


图 2.3-89 拱式换向器的典型结构

另外,当电枢直径在 280mm 以下时,用螺栓紧固已难以布置,必须用环形螺母固定换向器。当电枢直径更小时,采用塑料换向器。国外一些大型牵引电动机上采用带锥形弹性盘的螺母固定换向器。其目的是使换向器有轴向弹性,并且压圈的受力点尽量靠近梯排鸽尾的受力点,减少使压圈翻转的作用。图 2.3-90 是该种换向器的结构示意图。

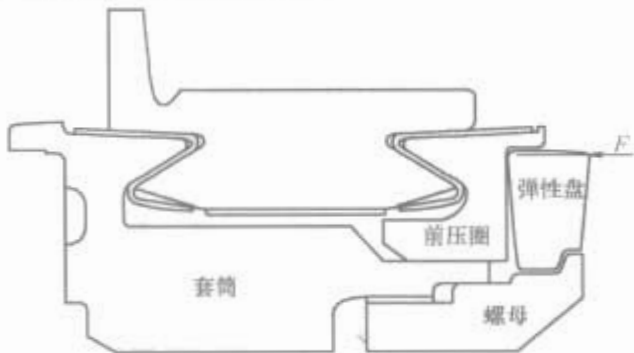


图 2.3-90 锥形弹性盘换向器示意

3.3.6.4 刷握装置结构

4 极电动机的刷握装置一般直接固定在机座壁上。6 极及更多极数的电动机,为方便检查及更换电刷,刷握装置装在可旋转的刷架圈上。目前趋向用单刷杆代替以往的双刷杆来支撑刷握,以便于清扫刷杆表面。刷杆表面一般套上有自清洁能力的聚四氟乙烯套,提高其耐电弧能力。刷盒一般用铸黄铜或铸青铜,国外也有用铬锆铜的,以提高其耐电弧能力。同时,在刷盒的外形上也要考虑在靠换向器一侧有较大的圆角和倾斜角度。刷握装置应有足够的刚度和耐振能力。压指系统的弹簧用盘式(钟表弹簧)或圆柱弹簧。前者在国外电动机上应用较多,其压力可调,系无关节结构,运行中不会产生黏滞现象,但制造难度较大;后者相反,在国产电动机上应用较多,见图 2.3-91。

盘式弹簧在新的国产电动机上也得到了应用。恒压弹簧仅在车上的辅助电动机或架承式的地铁电动机上得到应用。国外一些电动机还采用了双压指结构,以减小电刷压力。

3.3.6.5 牵引电动机用电刷

电刷采用分裂式结构是一大进步,它改善了电刷与换向器的接触稳定性,也增加了横向电阻,有利于改善换向。普遍采用二分裂式结构,也有采用三分裂式的。电刷材料采用电化石墨电刷,有的还采取浸渍树脂的方法,提高刷体的强度和耐磨性。一般均带有铜辫,用填塞固定,也有用铆钉固定的,以免电流经刷盒,对其产生电腐蚀。电刷顶部采用微

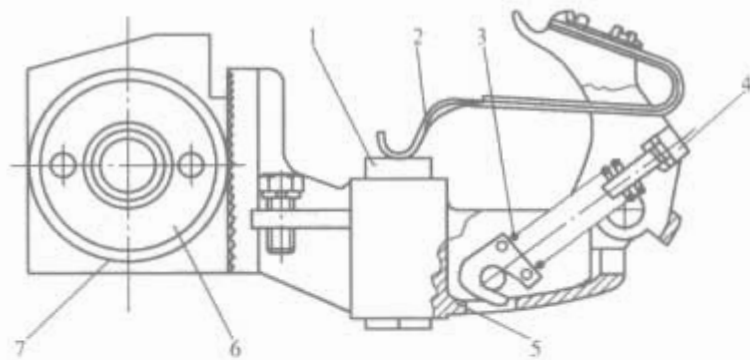


图 2.3-91 圆柱弹簧刷握装置

1—电刷; 2—压指; 3—弹簧;
4—调节螺栓; 5—刷盒; 6—刷杆; 7—刷杆座

孔橡胶减振垫是另一个成功的改进,可使振动和冲击得到阻尼,并且各刷片间的压力分配较均匀,各刷片的独立运动程度得到改善。正常情况下,电刷磨损率为 $2 \sim 3 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$ 。电刷的单位压力对抱轴式电动机为 $4 \sim 4.5 \text{ N/cm}^2$,比一般电动机高;对架承式电动机为 $3 \sim 3.5 \text{ N/cm}^2$ 。连续工况时,电刷电流密度在 $14 \sim 17 \text{ A/cm}^2$,比一般电动机高。在最大负荷时,该值还要增加 60% 以上。因此,使各电刷的负荷分配尽可能均匀更显重要。为此:

- (1) 要保证铜辫可靠填塞,采用镀银铜粉或石墨粉填塞。前者有利于减小铜辫与刷片的接触电阻;后者膨胀系数与刷片一致。在填塞处要用硅橡胶等弹性物封口。
- (2) 每刷杆的电刷应采用相同的牌号,不得混用,而且要保证电刷所受的压力均匀。
- (3) 增加每刷杆并联工作的电刷数,不少于 3。

3.3.7 电枢

(1) 电枢铁心。采用无方向性冷轧硅钢板,其平整度高,而且表面已有绝缘层,不需再涂漆,因而叠压系数高达 $0.96 \sim 0.97$ 。电枢直径较小时(500mm 及以下),叠片铁心直接套装在转轴上。为保证必要的过盈量($0.04 \sim 0.06 \text{ mm}$),可采取以轴配孔及铁心叠片预热的办法。电枢直径较大时,需采用电枢支架,以减小质量。

(2) 电枢绕组及导体布置方式。电枢绕组主要型式为单叠绕组,个别也采用单叠异槽绕组以改善换向。对于电压较高或功率较小的电动机,采用单波绕组。导体布置方式传统用导线竖放,导体垂向分为 2~3 个,尺寸不大于 8mm,以免附加损耗过分增加。该方式工艺简单,但槽满率较低。国外电动机采用导线横放方式,槽满率高,附加损耗明显减小,但导线进入换向器升高片之前要扭转 90° 而且要打扁,或不扭转直接将导线打扁,工艺复杂。国内脉流牵引电动机采用交叉竖放方式,槽满率提高,导线不需扭转,只需稍作打扁,工艺较简单。

(3) 电枢绕组绝缘。导线用聚酰亚胺薄膜或双玻璃丝包绝缘导线。对地绝缘用玻璃云母带和聚酰亚胺薄膜复合结构。通常为半叠包,也有用卷包(直线部分)或两种方式结合使用的。在对地绝缘外有的还半叠包一次聚四氟乙烯薄膜(厚度为 0.025 mm),以防浸渍漆的流失。由于采用以聚酰亚胺薄膜或薄膜与粉云母复合的绝缘结构,绝缘厚度只有原先单纯用云母绝缘时的 50%。又由于导线在槽内采取平放或交叉立放,槽满率显著提高。趋向每槽导体数减少,槽数增加,以有利于改善换向和散热。

(4) 均压线。均压线的数量一般为每槽一根,布置在升高片背后。为改善均压效果,趋向用每槽 2 根,甚至全数均压线。必须将均压线间的间隙填紧,并用无纬玻璃丝带绑紧,以免在冲击和振动作用下,产生导线折断或匝间短路。

(5) 电枢绕组固定。电枢绕组在槽部一般用槽楔固定。绕组端部趋向用有捻网状无纬玻璃丝带绑扎代替以往的非磁性钢丝。但是也有在无环火之虑的后端（非换向器端）仍用钢丝绑扎的。为保证绕组固定绝对安全，在超速工况下，槽楔或绑线要有4~5倍甚至更高的安全裕度。

(6) 电枢轴承及密封装置。由于轴向尺寸很紧，电枢轴承一般采用中系列。在传动端用不限位的滚子轴承，在非传动端用限位的滚子轴承。在功率较小、高速的地铁车辆和电动车组上，牵引电动机的非传动端用球轴承。轴承间隙用C4，比一般的大。轴承用锂基脂（3号）润滑，设有加油嘴，可定期补充油脂。传动端轴承的后轴承室应有通大气的孔，避免因内部负压将齿轮箱油和轴承油脂吸入电动机内部。图2.3-92所示为电枢轴承及密封装置典型结构。

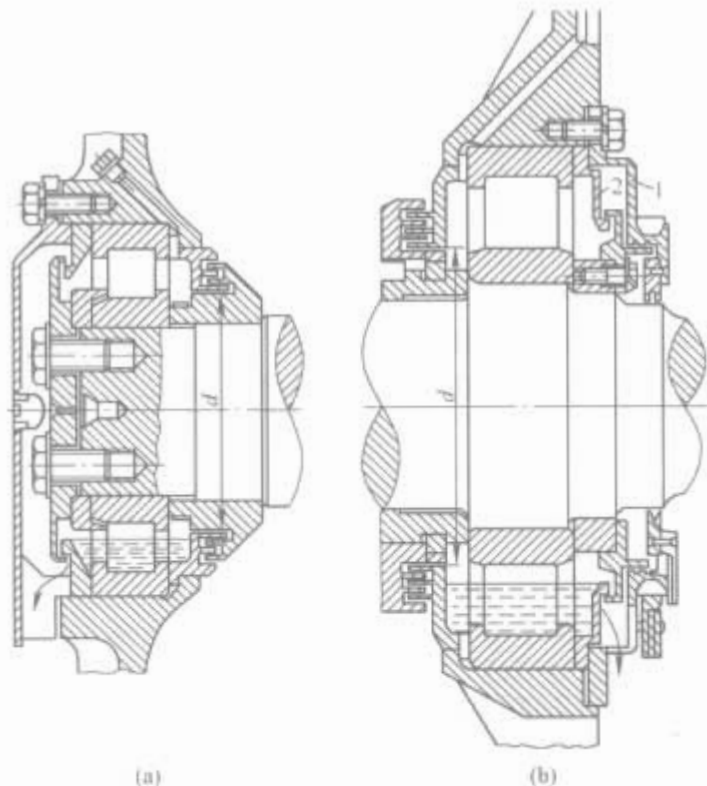


图 2.3-92 电枢轴承及密封装置典型结构
(a) 非传动端；(b) 传动端

3.3.8 机座及定子绕组

3.3.8.1 机座结构

机座传统上由铸钢制成多角形或圆形，适应复杂形状的要求，工艺性好，但磁路的均匀性较差，质量较小。现代直流牵引电动机大多用钢板焊成，磁路的均匀性较佳，质量较小。4极电动机一般采用多角形的机座，其空间利用好，主极线圈不用压弧，但机座加工费时。4极电动机一般不用刷架圈，在前端的换向器室要开几个观察孔，以便接近刷握，方便维护。6极及更多极的电动机，多采用圆形机座，国外一些电动机也有采用多角形机座的，因为采用了可旋转的刷架圈，只需在换向器室底部开一个观察孔即可。脉流牵引电动机则需在磁轭部位采用叠片磁桥，半叠片或全叠片方式，以减低涡流对脉流换向的不良影响。全叠片机座，由冲片叠压而成，容易实现多角形方式。由于定子的精度由冲模保证，定装品质大大提高，电动机的特性偏差也明显减小；而且采用多边形整冲的定子冲片后，导致一系列跟传统结构相比明显的变化：主极铁心与磁轭连成一体；主极线圈不需要压弧并被放在一个大的线槽内用槽楔固定；用剪冲代替部分机加工，以焊接代替部分铸造，提高了制造精度。图2.3-93为ZD115型脉流牵引电动机的横剖面图及定子冲片图。

3.3.8.2 主极及附加极绕组及其绝缘

4极电动机的主极绕组一般用双层平绕方式。为改善散

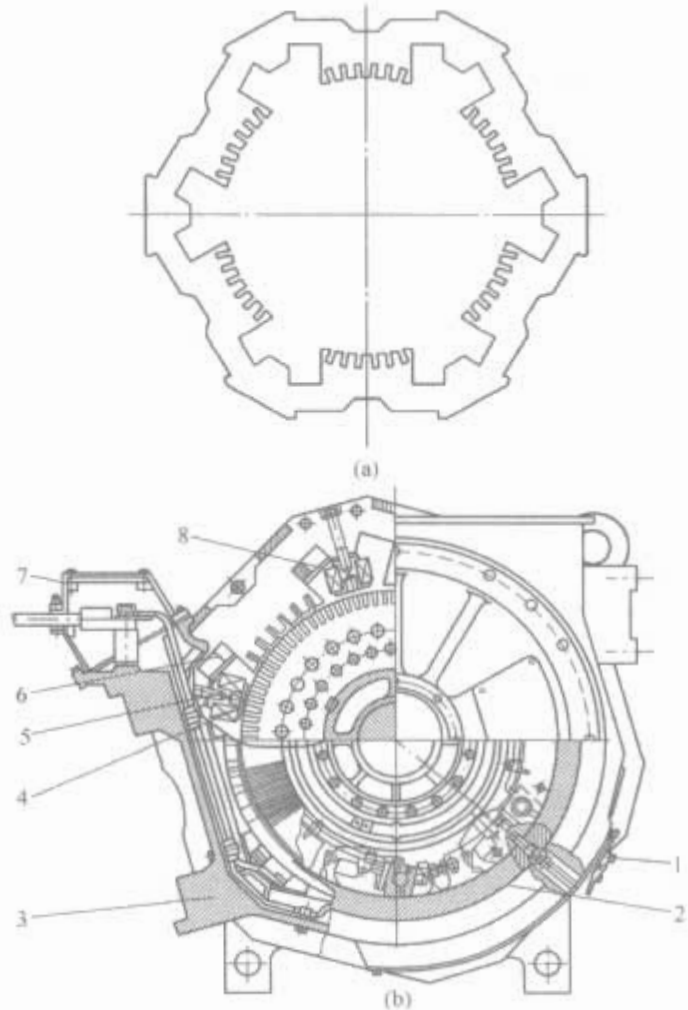


图 2.3-93 ZD115 型脉流牵引
电动机的横剖面图及定子冲片图
(a) 定子冲片图；(b) 横剖面图

1—观察孔盖；2—补偿绕组；3—空心轴套座；4—换向极绕组；
5—换向极铁心；6—主极绕组；7—接线盒；8—主极槽楔

热，一些电动机采取每层分别包绝缘的方式。6极及更多极的电动机则用扁绕方式。为保证主极和附加极绕组间至少有7~8mm的间隙，有时需将主极绕组削角。圆形机座时，为提高空间利用，还需将主极绕组压成弧形。附加极绕组均用扁绕方式。为增加其刚度，导线宽度不宜太窄，必要时还需在附加极绕组中部打上无纬玻璃丝带加强。扁绕时的弯曲半径应大于被绕导线的宽度。磁极绕组对地绝缘用少胶粉云母带绝缘。绕组与铁心间只留0.5mm间隙并用适形毡塞紧（且灌铸相应的胶）。定子整体采用真空压力浸渍及旋转烘焙工艺，使绕组与定子铁心成为一体。

3.3.8.3 补偿绕组

补偿绕组的用途是消除磁场畸变，改善换向器电位条件的有力措施。对于脉流换向、过渡过程的换向均有好处。一般认为，应采用补偿绕组、电机功率较大（大于800kW）、磁场削弱较深（ $\beta \leq 45\%$ ）的电动机。我国早期干线电力机车牵引电动机采用向心开口槽方式，工艺较复杂，后改用工艺较简单的平行开口槽方式。在后期新开发的全叠片机座牵引电动机上改用向心半开口槽方式，虽工艺较复杂，但性能较佳。补偿绕组的端部长，刚度差，应采用加强箍将其端部连接在一起，以增强其耐大电流冲击不变形及耐振的能力。另外，还应将补偿绕组和附加极绕组接在主电路的接地侧，以免环火接地时的巨大短路电流全部流经它们。

3.3.8.4 连接线

传统用螺栓将线圈引线头与连接线连接在一起，其接头质量大、耐振性差。采用低温银焊连接代替螺栓连接后，接头质量明显减小；同时，接头的耐过载能力也增加了。连接线有软、硬两种。软连接线用电缆或薄铜片叠成，硬连接线用铜母排制成。连接线要妥善固定在机座内壁，固定点数量

要够，还应用缓振措施，以避免产生共振。

3.3.9 抱轴轴承

这是抱轴式电动机的特殊部件，电动机通过它支撑在轮对轴上。该型式悬挂的电动机大量用在运行速度不超过 120km/h 的货运机车上。传统上采用滑动轴承。其工作特点：

- (1) 起动时负荷最大，油膜难以建立，工作条件差。
- (2) 因车轴弯曲，在轴瓦边缘有负荷集中现象。
- (3) 承受强烈的振动和冲击。

图 2.3-94 所示为抱轴油箱的典型结构。抱轴油箱需与机座结合在一起进行镗孔，它是不能互换的零件，只能与本身的机座配合一起使用。油箱为铸钢件，并且有相当复杂的形状，在它的内部装有润滑系统。油箱以紧配合安装在机座专门突出的止口上，因而压紧螺栓只受到拉伸。在油箱—机座与轮轴间装有轴瓦。油箱—机座镗孔时，通常在油箱和机座间加厚度为 0.35~0.5mm 的工艺垫片。因此，将轴瓦装入油箱时，轴瓦将紧密地压在油箱内，其内径将稍微减小。一般用毛线或毛毡给轴瓦供油。毛线的供油能力好，但吸油高度不高，需用恒油位油箱；毛毡吸油高度高，但供油量不大，适用于速度不太高的场合。国外一些牵引电动机采用油泵循环供油方式，低速及起动时仍靠毛线编制的给油器供油，在高速工况油泵能保证充分的给油量，轴瓦散热好，工作可靠，但结构复杂，也较重。在运行中，轴瓦的磨损将导致齿轮中心距破坏，齿轮间隙增加。通常认为，轴瓦与轮轴之间的总间隙应不超过 2mm。

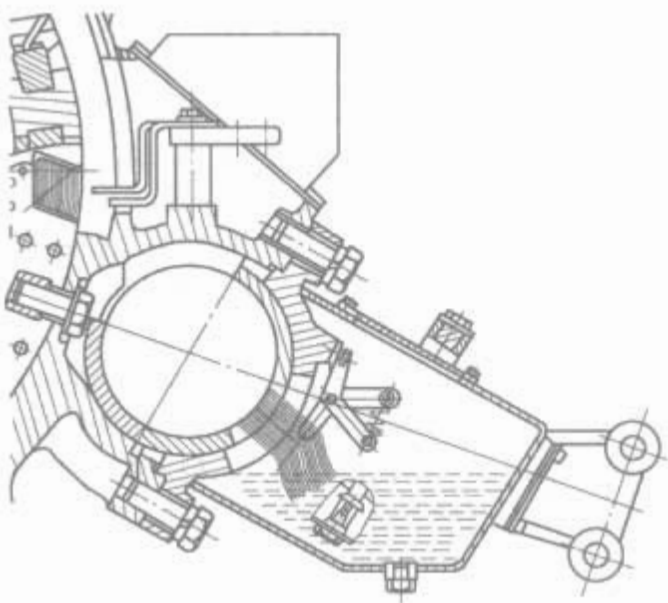


图 2.3-94 抱轴油箱的典型结构

目前的趋势是采用滚动抱轴轴承，它能保持齿轮中心距不变，改善齿轮工作条件。同时，不用经常给抱轴轴承加油，并且消除了润滑油向电动机和齿轮箱的窜油现象，减少了维护工作量。其抱轴部分为整体式独立结构，与电动机分成两体加工，可以互换。抱轴箱为长圆筒形，中间中空呈 U 形，两端为装有滚动轴承的轴承室。图 2.3-95 为 ZD114 型脉流牵引电动机的纵剖面图及其 U 形抱轴箱。

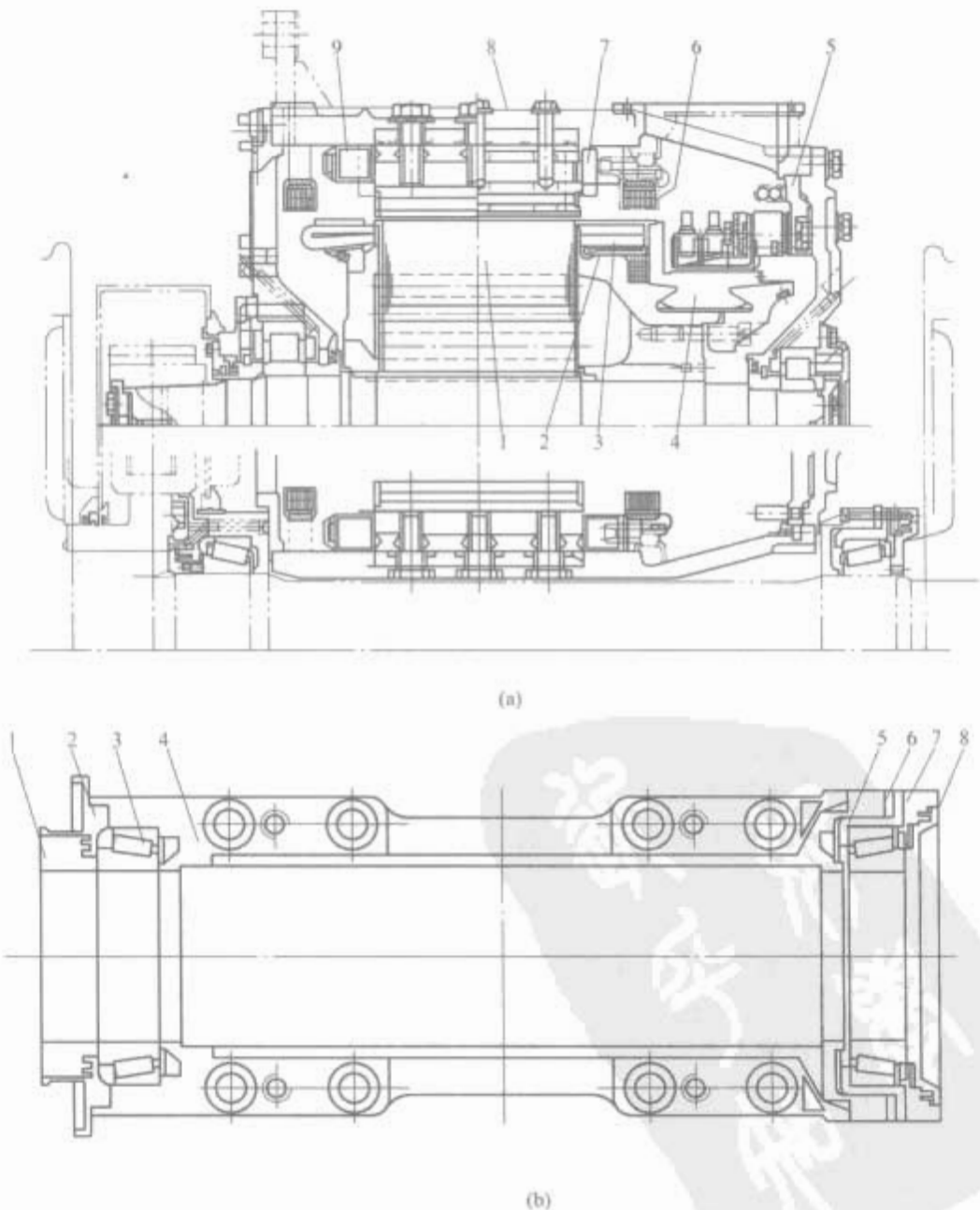


图 2.3-95 ZD114 型脉流牵引电动机的纵剖面图及其 U 形抱轴箱

- (a) 纵剖面图
1—电枢铁心；2—均压线；3—电枢绕组；4—换向器；5—刷架圈；6—补偿绕组；7—换向极绕组；8—机座；9—主极绕组
- (b) U 形抱轴箱
1—后挡环；2—后油封；3—轴承；4—抱轴箱体；5—轴承座；6—调整垫；7—前油封；8—前挡圈

3.4 异步牵引电动机

我国铁路牵引动力正面向交流传动电力牵引发展时期，采用异步牵引电动机变得越来越普遍。异步牵引电动机多数采用鼠笼型，因此结构简单，工作可靠。

逆变器与电动机之间互相依存，首先有大电机小逆变器系统和小电机大逆变器系统之分。从经济性考虑，大功率机车逆变器容量大，采用大电机小逆变器系统比较经济，它们用于机车和动力集中的动车组。对于动力分散的高速动车组，由于齿轮箱和联轴节占相当空间，给电动机的有效空间紧而小，只有采用小电机大逆变器系统才能满足空间尺寸的要求。用于不同逆变器系统的电动机在设计上也有很大区别。

对大电机小逆变器系统的电动机，要求电动机有大的启动转矩。在启动过程中按机车的黏着条件设计转矩，额定点与进恒功点接近。由于电动机启动转矩大，逆变器受器件限制，输出的电流要求小，电动机不得不提高电压和降低磁化电流来满足逆变器的要求，如“中华之星”动车组的异步牵引电动机，因此电动机的质量和尺寸相对较大。

对小电机大逆变器系统的电动机，要求电动机体积小，它的恒功区的低速点低，额定点的转速较高，且设置在使用概率最高的区域，所以额定点的电压会比较高。由于电动机磁路原因，低速恒功点只能设计在低电压区，这样电动机恒功区的电压由小变大，电流由大变小。因此电流比较大，电压值又比较高，逆变器的容量比较大。因此，这两种电动机的设计思路是不一样的。

3.4.1 设计特点

异步牵引电动机系统主电路原理图见图 2.3-96。异步牵引电动机由逆变器供电，它的转速信号由它的速度传感器反馈给逆变器的控制器，所以设计前必须慎重考虑下面的三个要素。

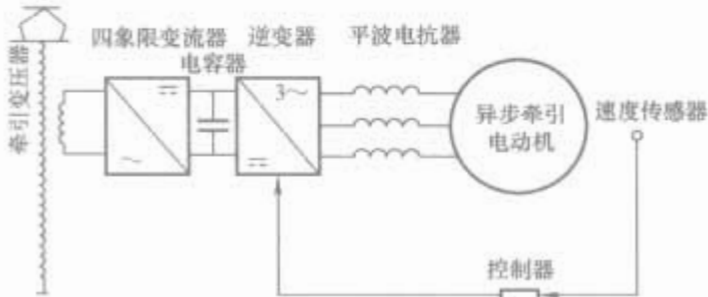


图 2.3-96 异步牵引电动机系统主电路原理图

3.4.1.1 异步牵引电动机与逆变器的关系

异步牵引电动机应该按交流传动系统 SPWM 逆变器供电的原则进行设计。设计前必须与逆变器设计者达成相关的技术协议，逆变器设计者必须告知供电电压的谐波分量与逆变器的开关频率等关键参数，开关频率高时可以省掉电动机侧的平波电抗器。

在开关频率较低时，可以采用高定子漏抗的电动机来抑制谐波电流。例如，“中华之星”的电动机采用了高定子漏抗，所以在额定电压下高速恒功区偏低。为了提高恒功区的宽度，在高速区必须采用升高电压的方法来补偿。开关频率更低时，电动机的转矩脉动偏大，且温升偏高，所以必须安装电抗器来抑制谐波电流。串联在三相电路上的电抗器又会严重降低高速恒功区的转矩，到一定转速时必须短接电抗器，造成电路电流的突变，电气系统有扰动，严重的会发生发散似的振荡，对逆变器和牵引电动机都有害，所以短接点的选择很关键，选择恰当，可以减小电流和转矩的冲击。在最新设计中，

力求提高逆变器的开关频率，这种方法可以省掉电抗器，消除由于短接电抗器带来的一系列问题。

逆变器设计者必须向电动机设计者告知逆变器的接线方式是二电平、三电平还是多电平；与接线方式有关的电压和电流的谐波分量；逆变器的开关频率。电动机设计者要采取有效措施避开开关频率和电动机的齿谐波的相关频率段发生谐振，避免由谐振造成的电气和机械振荡；减少电磁噪声；电动机的绝缘结构和接线盒等部件必须承受逆变器输出的高频的最高重复峰值电压。

逆变器设计者应该采取有效方法防止电动机进入恒压区时产生转矩的脉动；从时间常数上保证系统的稳定和快速响应；在调制过程中防止电压和电流的过冲；在控制策略上保证恒压和恒流的精度；保证转矩的调节精度。

在异步牵引电动机设计过程中，必须和逆变器设计者按相关协议进行多次协商，提出电动机的数学模型和计算结果，如在 150℃ 时电动机的定子相电阻、转子等值电阻、定子漏感、转子漏感、励磁电感、电机端电压、电流、功率、转差率、平均转矩、效率与电动机转速的函数关系，牵引时按牵引特性提供（见图 2.3-77），制动时按制动特性提供（见图 2.3-78）；告知速度传感器输出的信号等。

3.4.1.2 异步牵引电动机与转向架和齿轮传动系统的关系

机械传动系统和电动机是分开设计的。异步牵引电动机设计者除了要满足逆变器的要求外，还必须满足整车的牵引力和速度的最基本要求，满足电动机悬挂方式的要求。高速机车和动力集中动车组的牵引电动机采用架承式悬挂安装方式，或半车体架承式悬挂安装，牵引电动机通过齿轮、空心轴和六连杆将牵引电动机转矩传递给轮对。或者采用车体架承式悬挂安装方式，牵引电动机通过齿轮、万向节将牵引电动机转矩传递给轮对。

动力分散的高速动车组的牵引电动机采用转向架架承式的悬挂方式，见图 2.3-97。电动机的一侧固定在转向架构架上，牵引电动机转轴通过球形齿轮联轴节和齿轮传动装置将牵引电动机转矩传递给轮对，适用于 200km/h 及以上的动车组。

货运机车的牵引电动机一般采用抱轴式悬挂安装方式，见图 2.3-98。牵引电动机通过小齿轮和大齿轮将牵引电动机

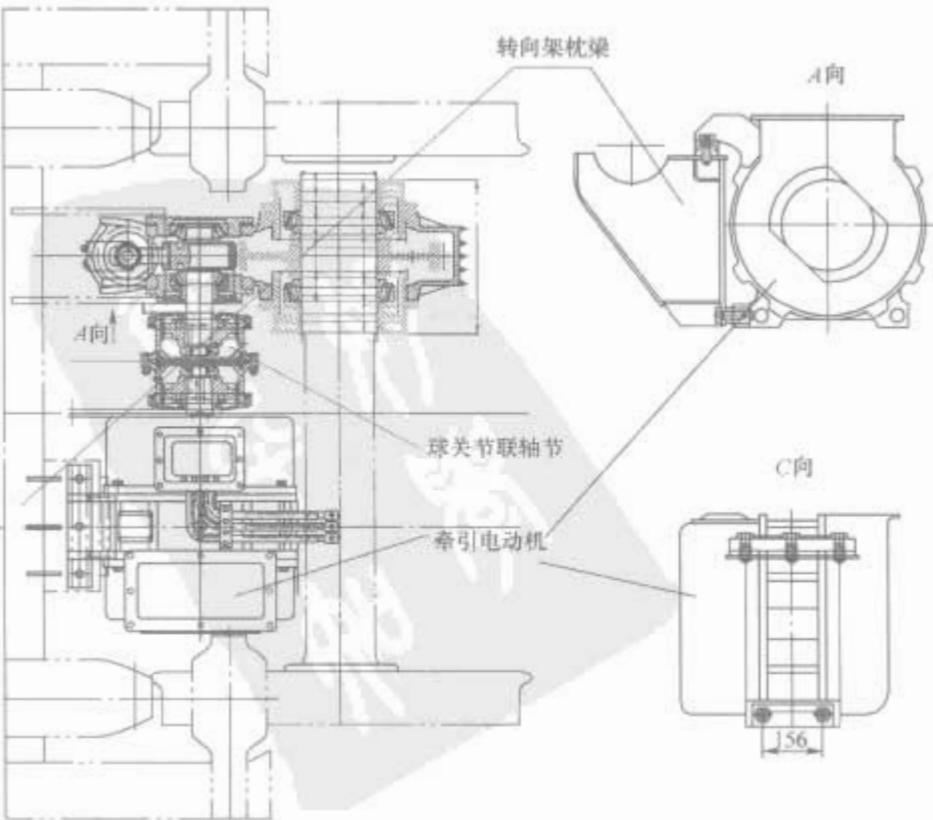


图 2.3-97 异步牵引电动机架承式悬挂结构

转矩传递给轮对。这种结构比较简单，但电动机要直接承受来自轮对和钢轨的振动和冲击，所以只适用于 140km/h 以下的货运机车。

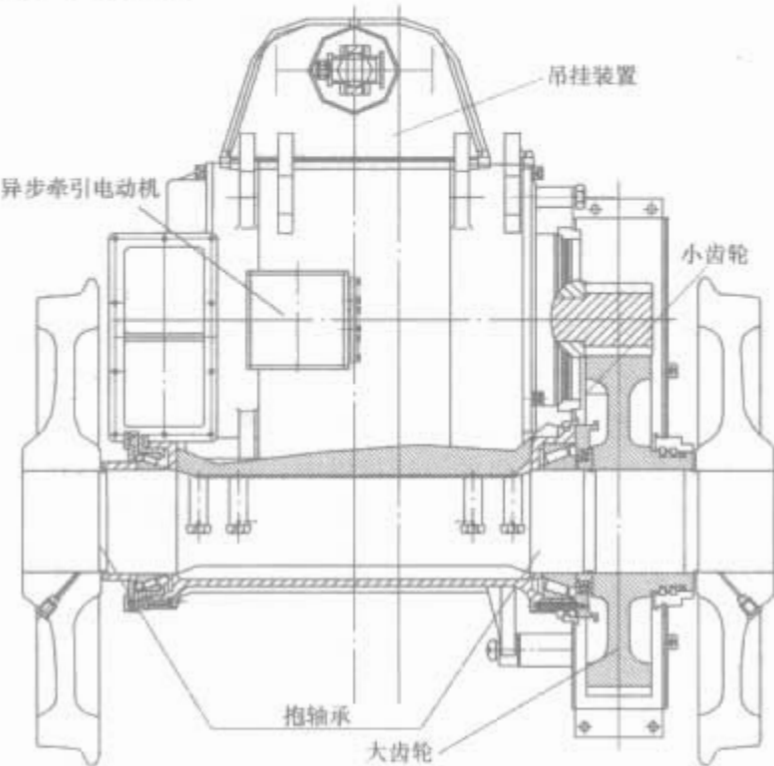


图 2.3-98 异步牵引电动机抱轴式悬挂

由此看出，异步牵引电动机还必须满足转向架、轮对、联轴节和齿轮箱的空间要求。牵引电动机设计除了必须满足机车速度与轮对踏面上的牵引力这一最基本的要求外，还应该满足大、小齿轮的齿数、齿轮模数、齿轮宽度、中心距、悬挂方式和在转向架中容许电动机放置的极限空间等要求。

3.4.1.3 电动机轴承润滑方式

由于异步牵引电动机的转子结构简单可靠，适合高速旋转，不管电动机用于货运机车还是客运机车，均采用高转速的电动机，故要求异步牵引电动机必须选用高转速轴承，因此，电动机出力大、功率高、体积小，有利于转向架的布置；再加上它的转差特性和轮对与钢轨的黏着特性吻合，有利于机车的轴重和黏着的充分利用。

对于动力集中动车组和机车而言，牵引电动机采用高转速的交流异步牵引电动机，电动机功率大，出力也大，所以传动端轴承（见图 2.3-99）应采用由齿轮箱供油的油润滑方式。利用齿轮箱内润滑油的飞溅，把润滑油储存在齿轮箱顶部的油槽内，利用压力差通过轴承盖进油口的过滤网，把润滑油引入电动机传动端轴承室的贮油环内。经过该贮油环的

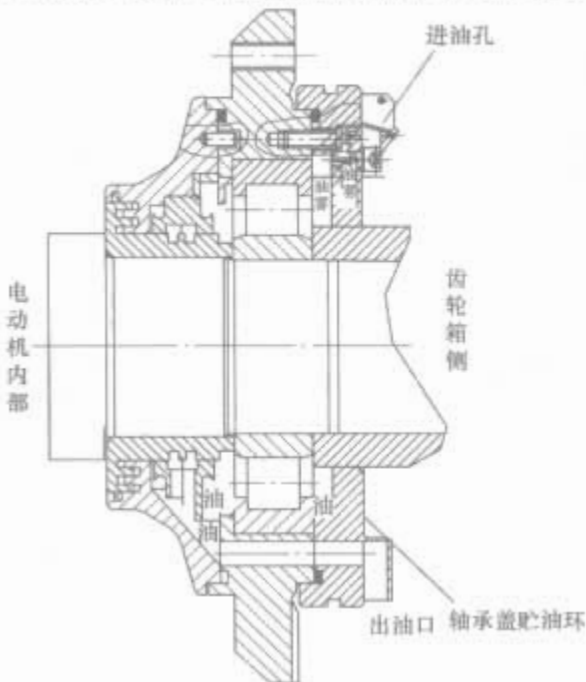


图 2.3-99 油润滑轴承

沉淀和过滤，把雾状的润滑油通过喷油螺钉的小孔喷向传动端的轴承。雾状润滑油在轴承处凝聚，形成轴承的润滑层。轴承排出的润滑油通过回油道回到齿轮箱，起到把轴承的摩擦产生的热量带走的作用。所以，牵引电动机的油润滑轴承首先要求进入的润滑油中的有害杂质少，不能在喷油口积碳，因为积碳易和金属磨屑及有害杂质结成油泥堵住喷油口。

目前，对动力分散动车组（含城轨车辆），牵引电动机的功率较小，两端轴承采用脂润滑。

无论是动力分散、动力集中的动车，还是动力车或货运机车，其牵引电动机非传动端轴承均采用脂润滑。

3.4.2 基本尺寸——定子外径 D_1 、定子轴向长度 L_1 和气隙长度 g 的确定

首先要确定与牵引电动机密切相关的转向架动轮的半磨耗轮径 D_L 和传动比 μ ，按机车速度和机车牵引力计算出异步牵引电动机的功率 P_2 、转矩 T 、转速 n 。

异步牵引电动机和其他电动机一样用电机利用系数 C 来选取电动机的关键尺寸——定子内径 D_{11} 和铁心长度 L_1 。电机利用系数为

$$C=0.116K_{dp}AB_g\times10^{-3} \tag{2.3-160}$$

$$AJ_s=AJ_s$$

式中： K_{dp} 为绕组系数； A 为线负荷，850~3000A/cm，高值用于短时和起动阶段； B_g 为气隙磁密，0.8~1.15T，高值用于短时和起动阶段； J_s 为电流密度，5~12A/mm²。 AB_g 和 J_s 的高值用于短时和起动阶段。

对于异步牵引电动机来讲，线负荷 A 、气隙磁密 B_g 和热负荷 AJ_s 比一般电动机大得多。

所以异步牵引电动机通常采用高导热耐高温耐电晕的绝缘材料。在设计时大量参考成功的设计和国内外同类产品的分析数据，从而由式（2.3-161）算出，即

$$L_1D_{11}^2\approx T/C \tag{2.3-161}$$

由于性能指标的原因，没有特殊需要时，通常异步牵引电动机的极数 P 取 4 和 6 两种。4 极电动机定子外径 D_1 相对大，供电频率低。4 极电动机定子外径由式（2.3-162）计算，即

$$D_1=(1.7\sim1.75)D_{11} \tag{2.3-162}$$

6 极电动机定子外径 D_1 相对小，供电频率高。在相同的定子外径时可以有较大的定子内径 D_{11} ，所以，6 极电动机的功率做得比 4 极大。6 极电动机定子外径由式（2.3-163）计算，即

$$D_1=(1.5\sim1.55)D_{11} \tag{2.3-163}$$

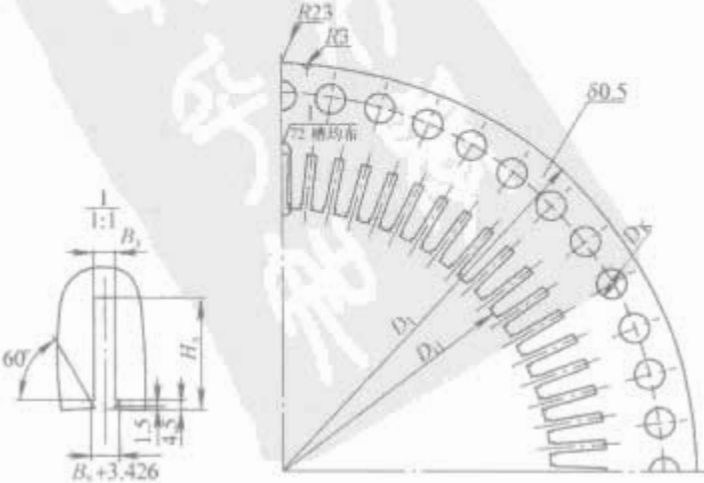


图 2.3-100 定子冲片的基本尺寸

定子冲片的基本尺寸见图 2.3-100。图中左侧是槽形图，右侧是 1/4 的冲片图，该电动机定子带轴向通风孔，即适合无机壳的高速电动机用。只要设计合理，这种冲片也可以作为货运机车的牵引电动机的定子冲片使用。

对高速动车组的牵引电动机来讲， L_1 受联轴节和空心轴等部件的影响先不确定，再由式 (2.3-161) 求出定子内径 D_{11} 。对货运电力机车的大功率牵引电动机，外径 D_1 的确定受到机壳外形的严格限制，先根据式 (2.3-162) 和式 (2.3-163) 求出 D_{11} ，再根据式 (2.3-161) 求得定子铁心长度 L_1 。转子内径 D_2 由转轴的机械强度确定，转轴一般选取高强度合金钢 35CrMoV、40CrMoV 和 42CrMoV 等，由于结构需要，采用 10~20mm 钢板做转子铁心冲片的压圈，它参与转子磁路中磁通的流通，特别是改善转子齿根高磁密的磁场效果显著，所以转子铁心长度 L_2 比 L_1 长 20~40mm，在进行磁路计算时要把转子压圈的厚度考虑进去。

由于正常牵引工作时电动机有来自地面的振动和转速高两个因素，气隙长度 g 比一般异步电动机取得大。

转子外径

$$D_2 = D_{11} - 2g \tag{2.3-164}$$

由于变频的需要，定子轭部磁密比齿部磁密相对较低，目的是在低频启动时充分提高磁通，不至于因为轭部磁路饱和和增加定子电流。在变频电机设计时还要考虑开关频率与齿谐波的谐振。进行逆变器设计时，应注意选取的开关频率应该避开齿谐波的电磁谐振转矩。

3.4.3 定子

3.4.3.1 定子有效层计算

(1) 每槽导体数。每槽导体数 N_{s1} 可以由定子绕组每相基波电动势的有效值和气隙磁密导出，即

$$|E_{\phi 1}| = |U_{\phi 1} - I_1(r_1 + jx_1)| \tag{2.3-165}$$

$$N_{s1} = mP/2 \ a_1 \xi_L U_{\phi 1} F_S / [1.11 f_1 Q_1 K_{dp1} \pi D_1 (L_1 + 2g) B_g] \tag{2.3-166}$$

$$Q_1 = Pmq_1 \tag{2.3-167}$$

式中： $U_{\phi 1}$ 为相电压； N_{s1} 为每槽导体数； m 为相数； P 为极数； a_1 为并联支路数； ξ_L 为满载电动势的系数，它是需要通过设计计算程序中的多次计算循环得到的系数； F_S 为波幅系数； f_1 为基波频率； K_{dp1} 为绕组系数； g 为气隙长度； B_g 为气隙磁密； Q_1 为定子槽数； q_1 为每极每相槽数。

(2) 导线的尺寸。导线的高度 A 和宽度 B 可以从导线的截面积估算

$$I_1 \approx 0.69 P_2 / U_{L1} \tag{2.3-168}$$

$$AB = S_1 + 0.214 \approx 0.69 P_2 / (a_1 U_{L1} J_s) + 0.214 \tag{2.3-169}$$

式中： J_s 为定子电流密度，异步牵引电动机可以取到 6~9； S_1 为导线截面积； U_{L1} 为线电压。

3.4.3.2 定子绝缘、槽形、槽数的选择

大部分的异步牵引电动机定子铁心采用矩形槽。定子绕组采用硬绕组，其绝缘应该根据电动机的脉冲最高重复峰值电压和 N_{s1} 制定电动机耐电晕的绝缘结构和绝缘规范（见表 2.3-37），再根据绝缘规范确定的匝间绝缘厚度、对地绝缘厚度、嵌线间隙、冲片不齐度和线圈公差等确定槽形尺寸。

对于小功率的异步牵引电动机，应用场合相对线速度较低，电源电压也比较低时，通常采用散嵌绕组。定子铁心采用半闭口的梨形槽，匝间采用耐电晕漆包圆线，对地采用耐

电晕的复合箔作为槽绝缘。散嵌绕组的定子槽满率可以根据制造厂的工艺条件尽量取高，绕组端部采用热缩带包扎和软端箍固定。

表 2.3-37 异步牵引电动机绝缘规范

名 称	规 格	绕 法	宽 度	高 度	图 示
导线	$A \times B$		B	$N_{s1} A$	
匝间绝缘	耐电晕 FCR 带		$2\delta_1$	$2N_{s1}\delta_1$	
对地绝缘	耐电晕 CR 云母带		$2\delta_2$	$4\delta_2$	
线圈公差			$+0.15$ -0.1	$+0.2$ -0.1	
嵌线间隙			0.2	0.25	
槽形公差			0.15	0.2	
楔下垫条	二苯醚板			0.5	
槽 楔	二苯醚板			3	
槽 口				1.5	
层间垫条	二苯醚板			0.5	
槽底垫条				0.5	
绝缘厚度					
线圈尺寸			$B \pm 0.15$ 0.1	$H \pm 0.1$ 0.1	
槽形尺寸			槽宽 B_S	槽高 H_S	
匝间绝缘	耐电晕 FCR 带		$2\delta_1$	$2N_{s1}\delta_1$	
对地绝缘	耐电晕 CR 云母带		$2\delta_2$	$4\delta_2$	
线圈尺寸			$2(\delta_1 + \delta_2) + B$	$2(N_{s1}\delta_1 + 2\delta_2) + N_{s1}A$	

最近开发的异步牵引电动机的定子采用轴向通风孔（通风孔直径 D_K ），能够有效散发定子铁心内部定子有效层产生的热量，可以降低定子绕组最热点的温度。异步牵引电动机的定子槽 Q_1 在结构许可的条件下尽可能取大，这对电动机的性能和散热有利。如果逆变器开关频率较低，需要较大的定子漏抗，可以适当减小 Q_1 或增加槽口高度。

异步牵引电动机需要采用耐高温、高导热和耐电晕的薄膜作为耐电晕绝缘结构的基础材料，配备耐高温的辅助材料和高强度耐电晕无溶剂浸渍漆。

3.4.3.3 耐电晕绝缘结构

表 2.3-37 表示的只是硬绕组的典型绝缘规范。国产异步牵引电动机开发的耐电晕绝缘结构，都采用 200 级耐电晕聚酰亚胺纳米薄膜（FCR）烧结线作为耐电晕匝间绝缘，耐电晕聚酰亚胺纳米复合云母带（CR 云母带）、耐电晕聚酰亚胺纳米薄膜和玻璃丝带分别叠包后作为对地绝缘，采用 200 级无溶剂浸渍漆真空压力浸渍（VPI），旋转烘焙干燥。耐电晕聚酰亚胺纳米薄膜是承受 SPWM 非正弦中开关频率方波电压的主绝缘，耐电晕聚酰亚胺纳米复合云母带既要承受 SPWM 非正弦中开关频率方波电压，又要起 VPI 浸渍漆的载体，故在绝缘结构设计时要有细微的绝缘通道把 VPI 浸渍漆渗透到线圈的每一部分。

耐电晕机理。绝缘介质超过起晕电压以后在高频方波电压作用下，会迅速老化而击穿，无机纳米粒子由于具有小尺寸效应和特殊的表面效应，在提高有机高分子耐电晕性能方面具有特殊的作用，主要表现在以下几个方面：

1) 荷电粒子屏蔽作用。聚合物中纳米复合材料在电晕的三种破坏作用下,处于表面的有机物层被逐渐破坏和分解,因无机纳米粒子很难被破坏而在材料表面暴露出来,停留在材料表面形成一层无机纳米颗粒组成的无机物层。由于无机纳米粒子表面存在大量缺陷和不饱和键,因此无机纳米粒子对荷电粒子具有较强的吸附和反射作用,起到保护内部有机高分子的作用,使材料表面层的耐电晕性能得以提高。

2) 屏蔽层高导热作用。相对而言,无机物的导热性普遍高于有机高分子聚合物。无机纳米颗粒在复合材料表面形成保护层以后,使电晕放电产生的热量很快通过传导、对流、辐射等作用形成高温区不耗散到材料表面上,从而避免了由于局部高温造成的热分解作用。

3) 臭氧屏蔽作用。由于无机氧化物屏蔽层的阻隔作用,电晕放电产生的臭氧(O_3)、 NO 、 NO_2 等有害气体不能直接作用于材料表面,而是要先经过无机材料层才能到达聚合物层。由于无机纳米粒子具有极大的比表面积,有害气体向聚合物扩散过程中被纳米粒子表面吸附和阻隔,使和聚合物发生作用的有害气体量大大减少。

综上所述,无机纳米粒子屏蔽层的形成大大缓解了电晕对聚合物的破坏作用,从而起到提高耐电晕性能的作用。从这一点来说,材料的耐电晕性能在很大程度上取决于无机纳米粒子屏蔽层的性质。这就要求纳米粒子在聚合物材料中分散均匀,并且要有一定的浓度,这也对耐电晕材料的合成提出了严格的要求。作为电动机的绝缘材料,除了有很好的耐电晕性能外,还需要有很高的耐温能力,有很强的机械强度,彼此之间要有很好的相容性,有稳定的化学性和生产制造必需的工艺性。

3.4.3.4 设计程序中需要输入的定子参数

D_1 (定子外径)、 D_{i1} (定子内径)、 L_1 (定子铁心长度)、 P (定子极数)、 Q_1 (定子槽数)、 a_1 (并联路数)、 N_{S1} (每槽导体数)、 A (导线高)、 B (导线宽)、 S_1 (导线截面积)、 D_{K1} (定子轴向通风孔直径)、 g (气隙长度)、 H_S (定子槽高)、 B_S (定子槽宽)、 k_{FE} (铁心叠压系数)、 Y (定子线圈跨距)、 L_{RZU} (定子线圈端部伸出直线长度)、 X_9 (定子线圈端部斜边间隙)、 J (定子线圈端部抬高)、 U (定子线圈端部鼻子直径)及 R_7 (定子线圈直线边和斜边的过渡圆半径)作为异步牵引电动机定子参数必需的输入数据,输入到设计程序中去,通过计算及对基本尺寸的优化或人机对话,便可完成电动机的定子全部参数和线圈计算并输出结果。它们作为异步牵引电动机电磁计算定子和线圈参数的输入数据再进入异步牵引电动机智能化设计平台中去,完成AUDOCAD的参数化设计任务。

3.4.3.5 定子结构

异步牵引电动机的定子按结构可分为有机座定子和无机座定子两种。

(1) 有机座定子。有机座定子由机座、定子冲片组成的铁心、线圈、线圈托架和出线盒等配件组成,见图 2.3-101。机座在异步牵引电动机中不是磁路的通路,只是结构件,用它来保证电动机的刚度和强度,它与定子铁心之间有通风道,担当冷却电动机定子的作用;机座两侧端面分别加工成轴向和径向 2 个止口,它的内圆加工成铁心挡、两端与前后端盖配合的 3 个重要止口,又起到保证电动机装配精度的关键作用。虽然它是异步牵引电动机的关键部件,但是毕竟要占电动机不少质量,又起到电动机与大气之间的隔热作用,所以它逐渐被无机座定子取代。

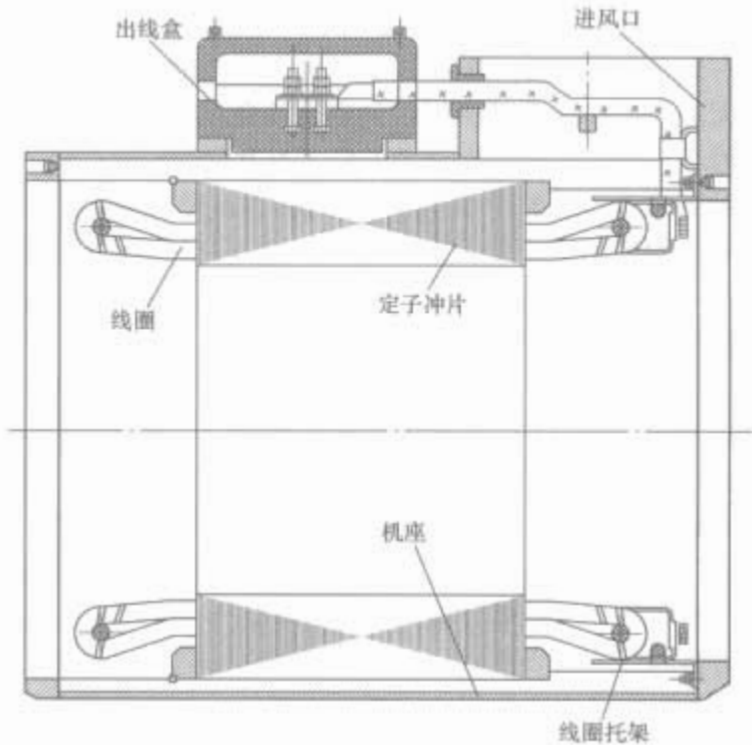


图 2.3-101 有机座定子结构

(2) 无机座定子。随着机车和动车组速度的不断提高,在保证电动机刚度和强度的前提下,要求异步牵引电动机的功率不断增大的同时又提出小型化和轻量化的要求,因为机座不是电动机磁路的必需部件,所以无机座定子的结构应运而生。它由定子铁心、线圈、线圈托架和出线盒等配件组成,见图 2.3-102。它既可以减小质量,又有利于定子散热。定子铁心由定子冲片、定子压圈和筋板组成。压圈和筋板起到机座的作用,它直接以定子冲片内圆为基准加工铁心两侧的压圈,加工出装配端盖的径向和轴向止口,省去了机座铁心挡定位机加工带来的积累误差,提高了装配精度。在靠近定子槽的部位有轴向通风孔,这部分的风路使冷却空气逼近定子线圈和通风孔通道,比有机座的定子铁心更有效带走定子线圈和定子铁心的热量。当然它的结构设计难度和制造难度也随之提高。以我国“先锋”号动车组的异步牵引电动机为例,在同一功率下,电动机质量比 2005 年引进的高速动车组电动机轻 15.7%,温升低 37.5%。

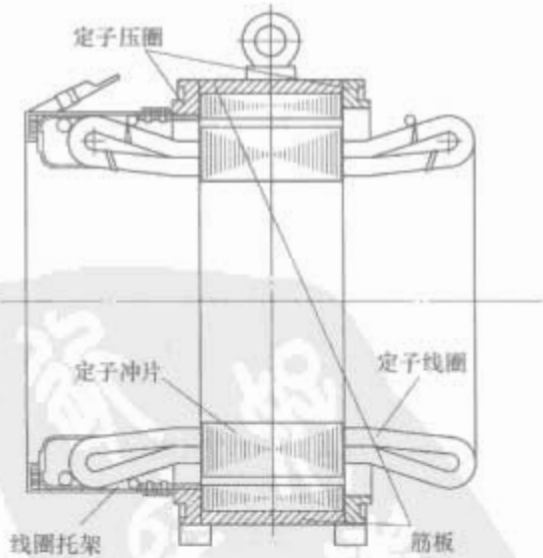


图 2.3-102 无机座定子结构

3.4.3.6 定子线圈

定子线圈个数多,既有利于线圈向铁心散热,又有利于减少定子的漏抗,提高电传动系统的恒功区。定子线圈个数少,既不利于线圈向铁心散热,增加定子绕组温升,又增加了定子漏抗,使电动机的恒功区变窄,系统性能变差。线圈托架的作用是防止线圈端部和它的引出线振动断裂,对它们起固定作用。线圈两端均采用软端箍固定,真空压力浸漆后

能够形成玻璃钢似的抗振整体。

异步牵引电动机的线圈设计和制造是异步牵引电动机的关键技术，特别是线圈端部斜边的弧度成形尤其关键，世界各国都在开发相应的涨形机，基本上有顶弧和压弧两种。我国发明的涨形机采用的是包弧原理并靠拓扑架来完成，采用具有中国特色的涨形机（见图 2.3-103）进行涨形。线圈（见图 2.3-104）涨完后不需要复形。该涨形机能够精确保证线圈的直线边在电机槽内的位置，其原理主要是涨形机的涨臂机构作围绕一根心轴的旋转运动，该心轴和左右鼻夹架的升高机构的轴线构成本机的主平面。涨形机的涨臂机构在主平面两侧按规定程序张开，在张开过程中线圈的直线边固定在直线柱状夹具内，精确保证直线边的长度和形状，防止线圈涨形时直线拐弯处的鼓包和裂纹。线圈的鼻部和斜边的弧度是靠它的鼻夹架和拓扑架一次同时完成的，因为它们靠拓扑架的精确形状自动完成左右两个龟背状复杂弧面圆锥母线的包弧工序。所有这些动作都是按线圈精确计算程序并在涨形过程中靠拓扑架的轨迹自动完成的，也可以说，该涨形机是为“线圈精确计算程序”配合发明的。新一代全自动计算机网络控制的涨形机已经投放市场。

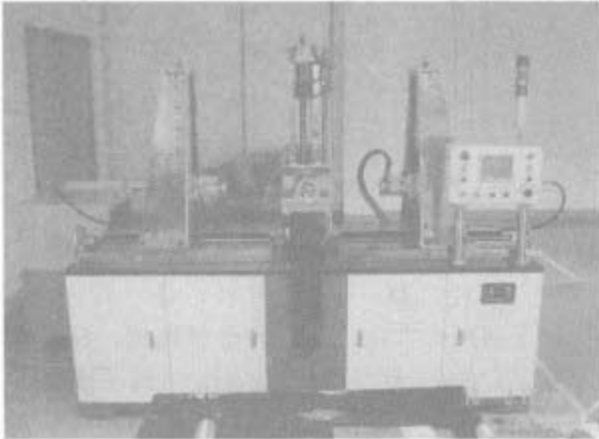


图 2.3-103 拓扑原理涨形机

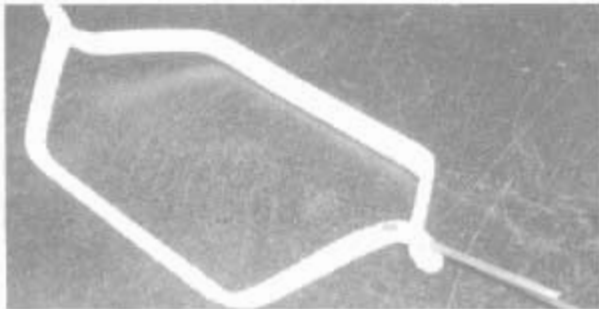


图 2.3-104 定子线圈

3.4.4 转子

3.4.4.1 转子有效层计算

一般铜条鼠笼转子采用直槽，铸铝转子可以采用直槽，但小功率电动机采用斜槽的居多。因为槽数 Q_2 选择不当，就会产生“寄生”转矩和电磁噪声，增加附加损耗；特别是 Q_2 不能等于 Q_1 ， Q_1 与 Q_2 的差值也不希望是电动机极数的倍数，所以异步牵引电动机以 4、6 极为多。经过长期的生产实践，推荐采用表 2.3-38 推荐的槽配合，供产品研究开发时选择，再通过产品试制进行进一步的验证。对于变频电动机定、转子槽数和槽配合的选择，还应该考虑 PWM 开关频率的影响。

为了固定鼠笼在转子槽中的铜导条，要合理选取导条与槽形的间隙，用矩形半闭口槽形，多数采用涨紧工艺（见图 2.3-105），铜导条插入转子冲片槽内，在铜导条顶上打出凹槽，此外导条两侧往外往上涨，使张开的局部材料把槽子挤紧。

表 2.3-38 异步牵引电动机推荐的槽配合

极数	定子槽数 (直槽)	转 子 槽 数
4	36	26* 28 44 46*
	48	38* 40 56 58*
	60	50* 52 68 70*
	72	62* 60 70 82*
6	36	26* 42 46
	54	44* 64* 68
	72	56 58 62* 82* 84 86
	90	76 78 80* 100* 102

* 表示优先采用。

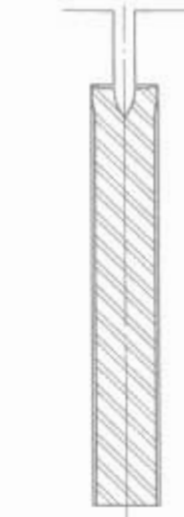


图 2.3-105 导条涨紧示意

转子电流 I_2 可以按式 (2.3-170) 估算，即

$$I_2 \approx 0.69 P_2 / U_1 \cdot N_{s1} Q_1 K_{dp1} / a_1 Q_2 \quad (2.3-170)$$

根据转子电流 I_2 选择导条截面积

$$S_R \approx I_2 / J_R \quad (2.3-171)$$

式中： J_R 为转子导条容许的电流密度。

对于异步牵引电动机， J_R 要满足逆变器控制调速的需要。为了加大转差和导条的机械强度，必须采用高电阻率的高强度铜合金，其值可以略高于定子电流密度。

转子槽高 H_R 和槽宽 B_R 尺寸的选择应该考虑磁路、导条的材质、导条的机械强度和制造工艺等因素。

3.4.4.2 专用铜合金

在一台逆变器供电给多台电动机的情况下，为了保证机车轮对的牵引力分配均匀，要求异步牵引电动机转差特性基本一致，所以要严格控制导条电阻率，采用铜条转子。为防止导条和端环焊接产生的热应力区，其应力集中的区域会造成断条，应该提高铜条转子导条的高温强度。高速异步牵引电动机的专用铜合金有 3 大类：

(1) 导条。异步牵引电动机铜合金导条既要求精确的电导率，又要求机械强度高，特别是高温下的抗软化性能。解决好这一关键技术，在合金设计时，根据微合金化原理，以 Cu-Zn 系为基础合金，调节锌含量，达到精确控制导条合金的电导率；在此基础上再添加微量合金元素 Cr、Zr 等，并控制加工处理工艺，使合金产生亚结构强化和沉淀强化，使铜合金强度在高温下性能稳定。通过系统研究，导条优化了铜合金熔炼铸造、加工及热处理等一系列工艺，使材料产生弥散强化、晶粒细化、固溶强化及加工硬化等作用，解决了焊接后导条热应力区的性能，保证了合金的机械性能、高温抗软化性能及精确的导电率。

(2) 端环。异步牵引电动机铜合金端环既要求导电性较好，又要求机械强度高，特别是在高温焊接后要保持高的机械强度，阻止材料的再结晶。根据微合金化原理，采用多元少量合金化的方法，以 Cu 为基础材料，调节微量元素 Cr、Zr 等，达到精确控制电导率和机械强度，使合金产生亚结构强化、沉淀强化和时效硬化；在保证合金高温与银焊料和导条均有很好的相融性的同时，又要提高焊接处的机械强度，特别是要解决高温下的局部再结晶问题，使相邻材料互相产生弥散强化、晶粒细化、时效硬化和固溶强化等作用，保证合金本身和焊接处的机械性能、高温抗软化性能及导电性能，并保证工艺的的稳定、材料的焊接性能可靠和可重复性好。

(3) 护环。异步牵引电动机铜合金护环要满足机械强度

高、韧性好、导热性好、与端环材料的线膨胀系数接近等要求。在比较几种锻造铜合金组织性能后，选择 Cu-Al-Fe-Ni 合金系为基础，根据微合金化原理，通过添加微量元素 Cr、Zr 等，改善合金的力学性能。通过系统地研究护环铜合金熔炼铸造、锻造加工及热处理工艺，优化熔铸、锻造加工和热处理工艺，使材料产生弥散强化、晶粒细化、固溶强化及加工硬化等作用，保证了铜合金护环的力学性能，与端环材料的线膨胀系数相一致，并使其工艺稳定、可重复性好、材料性能可靠。

3.4.4.3 转子结构

异步牵引电动机的转子由转子铁心、导条、端环、护环和平衡块等组成。

转子铁心由转子冲片、支架和转轴组成。

机车有客运和货运区分，客运机车传动比小，小齿轮齿数可以取大，套装在异步牵引电动机轴上，所以转子结构比较简单，如图 2.3-106 所示。

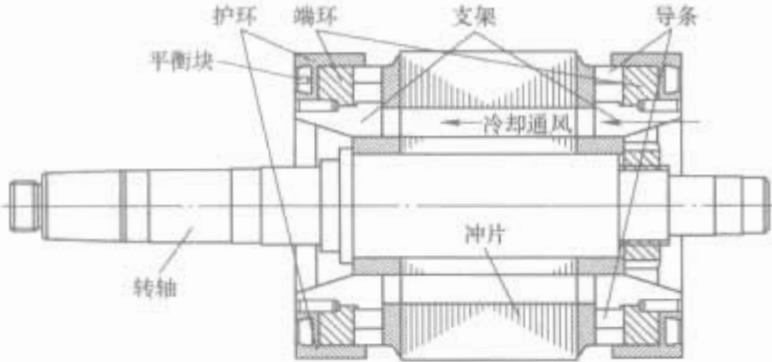


图 2.3-106 高速异步牵引电动机转子结构

(1) 高速异步牵引电动机转子结构。图 2.3-106 所示是一个典型的高速异步牵引电动机转子结构图，冷却空气由非轴伸端端环内圈的轴向通风孔进入，通过支架的通风通道，由轴伸端端环内圈的轴向通风孔吹出。

端环紧套在转子支架上，并有圆销周向固定端环。这种结构既可以补偿电动机旋转产生的端环离心力，防止端环产生的径向和切向疲劳振动，改善导条的受力条件，支架还可以把端环在故障供电时发生的过热热量迅速传递给转子铁心，降低焊接处的温度，可对转子断条起到保护作用。

(2) 货运机车异步牵引电动机转子结构。货运机车传动比大，小齿轮齿数只能取小。小齿轮或者插入在异步牵引电动机轴内，相应的典型结构见图 2.3-107，或者将小齿轮和转子转轴做成一体。

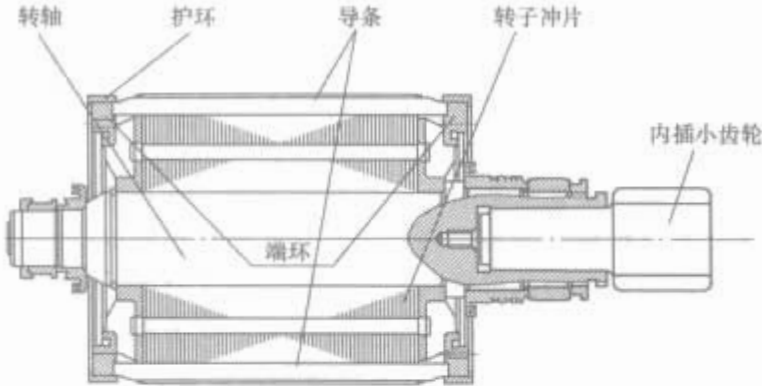


图 2.3-107 货运机车用异步牵引电动机转子结构

图 2.3-107 所示是一种典型的货运机车用异步牵引电动机转子结构图，采用内插小齿轮的转轴结构，传动端的轴承比较大，电动机的转速也相当高，轴承需要采用润滑油润滑，所以转轴上套有比较复杂的油封。

冷却空气同样由非轴伸端端环内圈的轴向通风孔进入，通过支架的通风通道，由轴伸端端环内圈的轴向通风孔吹出。

端环紧套在转子环状支架上，并有圆销周向固定端环。这种结构既可以补偿电动机旋转产生的端环离心力，防止端环引起的径向和切向疲劳振动，改善导条的受力条件，支架还可以把端环在故障供电时发生的过热热量传递给转子铁心，防止焊接处温度过高，对转子断条起到保护作用。

异步牵引电动机由逆变器供电，无论是客运异步牵引电动机，还是货运异步牵引电动机，加在电动机定子绕组上的高次谐波电流造成的损耗大部分集中在转子导条和端环上，正常负载下出风口侧的端环温度高达 330℃，对于这一侧的轴承和定子绕组的温度有一定的影响，在设计时应该充分考虑。

3.4.4.4 转子冲片的基本尺寸

转子冲片的基本尺寸如图 2.3-108 所示。

转子槽形有矩形槽和梨形槽 2 种，铜条转子采用矩形槽，直槽；铸铝转子采用梨形槽，斜槽。图 2.3-108 所示是矩形槽结构。

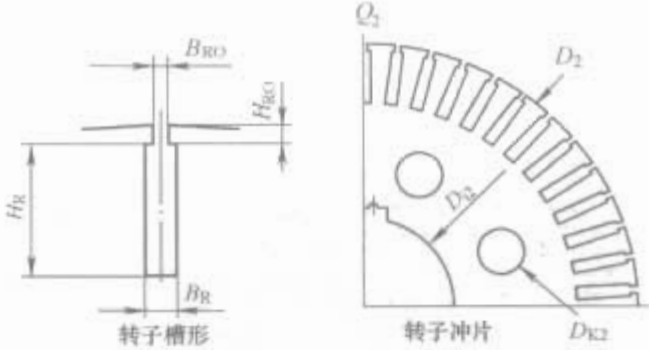


图 2.3-108 转子冲片的基本尺寸

D_2 —转子外径； D_{k2} —转子内径； Q_2 —转子槽数； D_{k2} —转子通风孔直径； B_R —转子槽形宽； H_R —转子槽形高； B_{R0} —转子槽口宽； H_{R0} —转子槽口高

3.4.4.5 设计程序需要输入的转子参数

除了转子冲片的基本尺寸外，还需要补充 L_2 （转子铁心长）、 B_{SK} （转子斜槽宽度）、 ρ_{Rb} （转子导条电阻率）、 ρ_{Rd} （转子端环电阻率）、 D_R （转子端环中径）、 S_R （转子端环截面积）。它们作为异步牵引电动机转子参数的输入数据输入设计程序，通过计算过程对基本尺寸的优化或人机对话，便可完成电动机的转子结构参数计算并输出全部计算结果，它们作为异步牵引电动机电磁计算转子参数的输入数据转入异步牵引电动机智能化设计平台中去。

3.4.5 特性计算

我国异步牵引电动机技术设计已经形成计算平台，在设计成功的基础上正在向“异步牵引电动机智能化设计平台”系统扩展，下一步是解决参数化绘图和建立专家库的问题。

异步牵引电动机特性计算目前采用“异步牵引电动机技术设计计算平台”的设计程序组进行，该设计程序组包含牵引工况的 5 个子程序及制动工况的 5 个子程序，计算按设定的输入文件进行。异步牵引电动机技术设计平台逻辑框图见图 2.3-109。

利用异步牵引电动机技术设计平台可以计算出在牵引工况的起动、升压恒功、恒压恒功、高速升压恒功和自然特性区域的特性曲线，计算出制动工况低速区和高速区的全部特性曲线。

牵引特性指牵引力，输入频率，逆变器输出线电压、线电流，电动机轴功率，电动机基波效率，电动机基波功率因数，转子频率，转差率，转速，转矩和电动机最大转矩倍数与速度的关系，牵引工况全部参数在第 1 象限；与牵引特性相似的制动特性指制动力，输入频率，逆变器输出线电压、

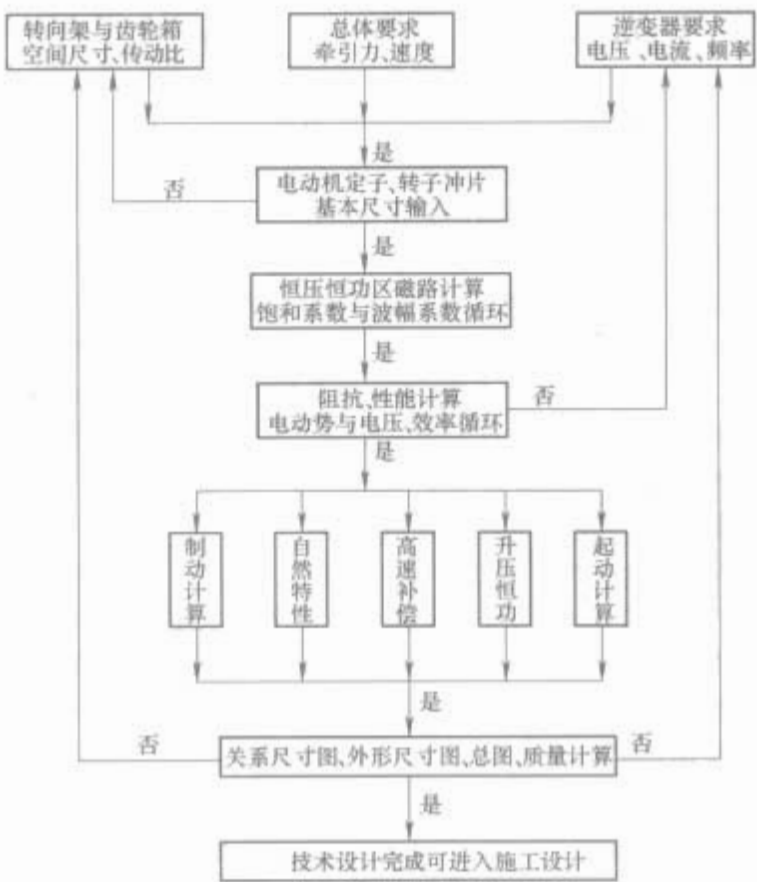


图 2.3-109 异步牵引电动机技术设计平台框图

线电流，电动机轴功率，电动机基波效率，电动机基波功率因数，转子频率，转差率，转速，转矩和电动机最大转矩倍数与速度的关系，制动特性分布在第1和第4象限。制动工况的输入频率，逆变器输出线电压、线电流，电动机基波效率，电动机基波功率因数转速和电动机最大转矩倍数共7个参数在第1象限；制动力、电动机轴功率、转子频率、转差率和转矩5个参数在第4象限。牵引特性见图2.3-77，制动特性见图2.3-78。

3.4.5.1 牵引工况的5个子程序

(1) 牵引起动子程序。牵引起动子程序的特点是：这一阶段要求最大转矩倍数大，必须取高磁通，很低的频率（接近转差频率）起动；计算中不需要电压和效率循环，必须用矢量和复变函数进行精确计算；这一阶段功率因数很高，效率低，意味着电流与磁通的矢积大，转矩大，牵引力大；在起动过程中，功率、电压随着定子频率 f_1 的增加不断上升，电流随着牵引力的降低而减小或牵引力不变电流不变；效率不断增加。

(2) 牵引升压恒功子程序。牵引升压恒功子程序的特点是：在定子频率 f_1 升高时电压升高，功率不变，电流减小；计算中电压和效率参与循环，效率不断增加并会趋向饱和，功率因数也会趋向饱和；牵引力随着速度的提高而下降。

(3) 牵引恒压恒功子程序。在这一阶段，随着定子频率 f_1 的增加，效率、功率因数会出现最佳点，电流会出现最小的极值，电磁负荷会出现最佳点，最大转矩倍数会下滑，其终点是根据控制水平设定的，所以电动机的基本尺寸和数据是用此程序计算得来的。

(4) 牵引高速升压恒功子程序。为了拓宽恒功区，根据逆变器器件水平，适当增加电压。这种方法可以提高交流传动系统的可靠性。

(5) 牵引自然特性子程序。在恒功区以后，定子频率 f_1 再增加，为了保持系统稳定，功率自动下滑，一直到机车的结构速度。

这5个子程序是异步牵引电动机技术设计平台的核心，还需要在实践中不断完善和丰富。

3.4.5.2 制动工况的5个子程序

异步牵引电动机有很好的制动特性，制动功率可以大于牵引功率，这一点在城轨车里普遍采用，实现迅速制停。采用四象限变流器可以自动实现再生制动，只要定子频率 f_1 一降低，立即进入再生制动。一般情况只需要低速制动、恒功制动和高速制动3个制动子程序就可以了。需要充分利用制动黏着条件的大功率货运机车，可按牵引工况那样精确控制制动力，增加2个制动子程序找到对应的5个精确控制用的制动子程序。制动子程序的选择还要根据黏着限制和电动机温升限制来决定。

(1) 高速制动子程序。同一电压下，高速制动力可以大于等于高速牵引力。为了防止异步牵引电动机失速，电动机的制动转矩必须小于电动机制动状态的最大电磁转矩。对大功率异步牵引电动机来讲，还必须按黏着条件来控制制动力。高速制动子程序就是按失速和黏着条件来设置的。

(2) 限速制动子程序。在长大坡道上，机车或动车组持续下坡，尤其是货运机车，如果采用机械制动要消耗大量闸瓦，采用限速制动，以恒定的速度进行制动时的速度控制，虽然再生的功率不一定恒定，但可以节省大量的闸瓦材料和轮对的磨损，保证运行安全。

(3) 恒压恒功制动子程序。为了充分回收制动能量，在限速以前可以采取节能程序来控制机车速度，此时电动机以恒定的功率用再生制动的方式向电网反馈能量，达到限制速度时自动进入限速。这对我国最大坡道地区特别有用，节能显著。

(4) 恒功制动子程序。从发电机的发热角度讲，制动功率相当于发电机发出的电功率，因为损耗的关系，轴上输入的机械功率可以比由绕组输出的电功率大2%~5%，再加上传动损耗，对异步牵引电动机来讲，制动功率可以比牵引功率大4%~10%。但功率能否实现，主要看机车的黏着条件，轴重转移，在货运机车中特别强调轴重转移。

(5) 低速制动子程序。异步牵引电动机可以通过调节电气制动系统的定子频率实现低速制动直到制停，在这个程序里，磁通取最大，定子频率 f_1 不断下降，保持持续稳定低于转子转速的转差，便可得到稳定的制动力。按照轮轨黏着条件，应用轮对防滑限制的程序进行控制。为了制停电动机，逆变器还可以输入负转差，采用相当于反接制动的办法实现制停。因为制动对机车来讲是减速过程，在大制动力的很低速度区间内运行时间都比较短暂，发热不是主要问题，而轮对的滑行擦伤却不能忽略。

异步牵引电动机技术设计平台靠10个子程序的输入文件来连接。

3.4.6 总装

异步牵引电动机的结构与工业用异步电动机相似，但因为牵引电动机小型化、轻量化的要求严格，所以空间尺寸限制比较严格，一般它相当于普通电动机的1/3。目前它与工业用异步电动机的不同之处，主要在于它必须有测速系统向逆变器控制系统提供频率反馈信号。它由速度传感器、安装盘和盖、测速齿盘组成。它们之间同轴度要求高，装配时要特别注意它们的定位销的位置和接线标志。有些异步牵引电动机还配置有PT100温度传感器及轴承温度和振动传感器。

3.4.6.1 高速动车组异步牵引电动机

图2.3-110所示为典型的高速异步牵引电动机总装图。为了轻量化，要求端盖一般采用高强度铝质端盖。轴承采用铁路专用的高寿命轴承，试验证明优质油脂UPG2目前对异步牵引电动机轴承是很好的。异步牵引电动机对轴承装配要求非常严格。特别要注意，电动机装配完成后要先在

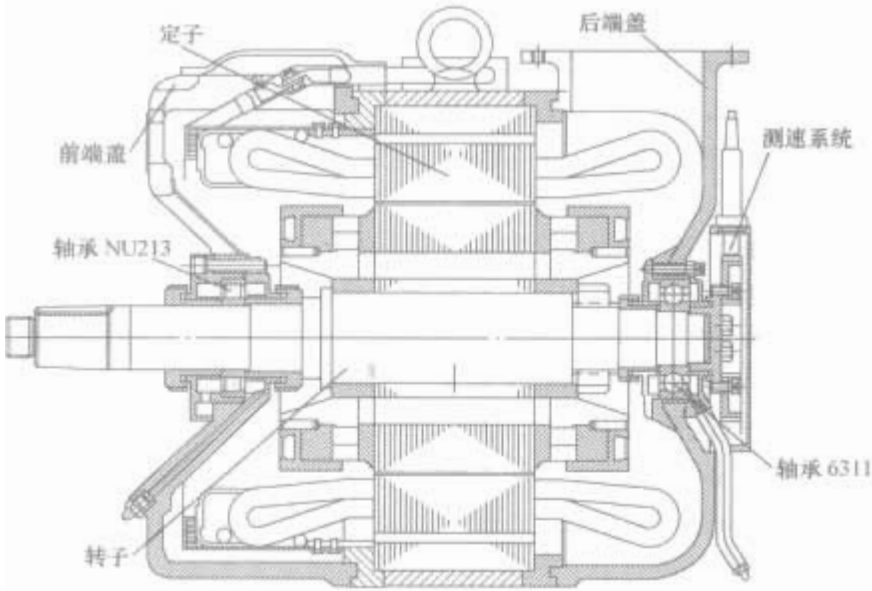


图 2.3-110 典型高速异步牵引电动机总装图

低速下试运转，以便建立充分润滑的油膜。

3.4.6.2 动力集中动车组异步牵引电动机

图 2.3-111 所示典型动力集中动车组异步牵引电动机总装图。

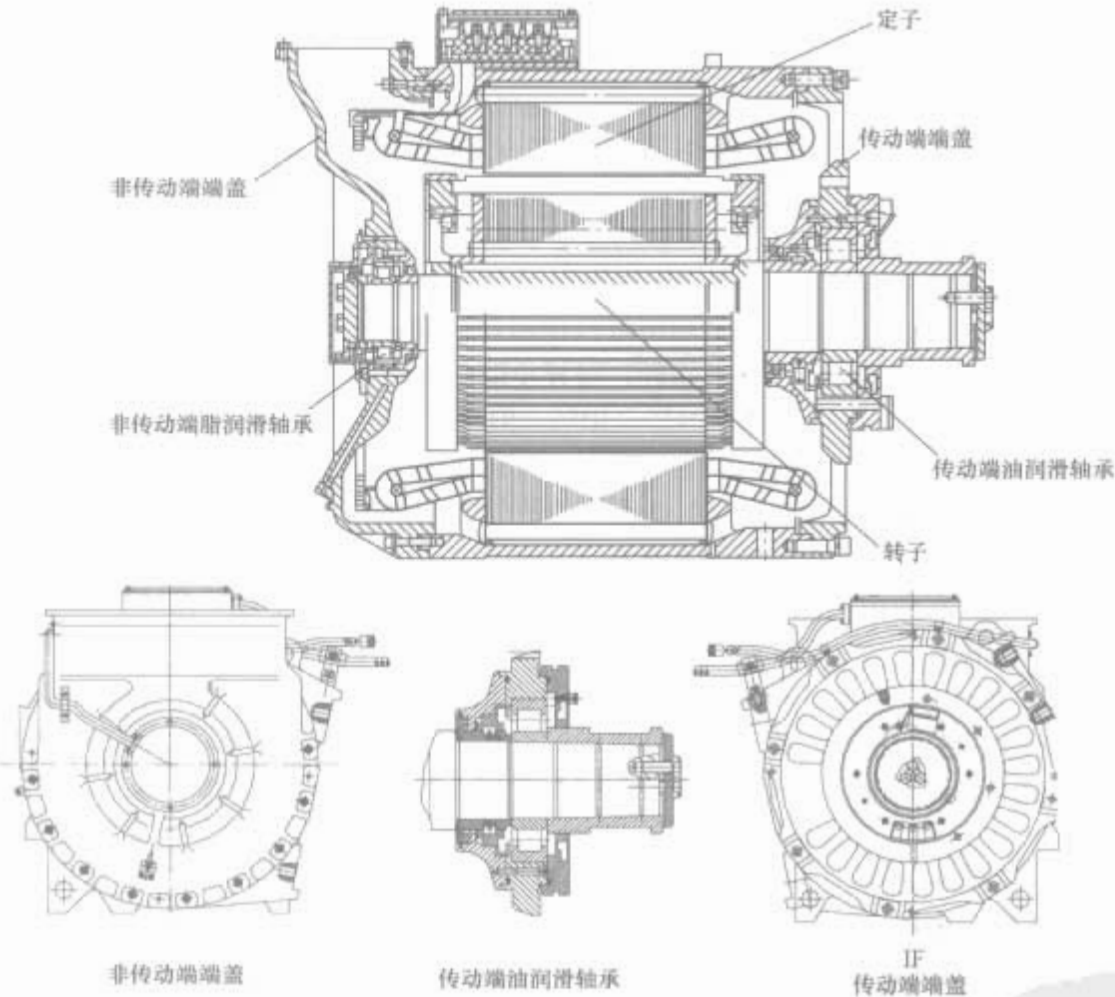


图 2.3-111 典型动力集中动车组异步牵引电动机

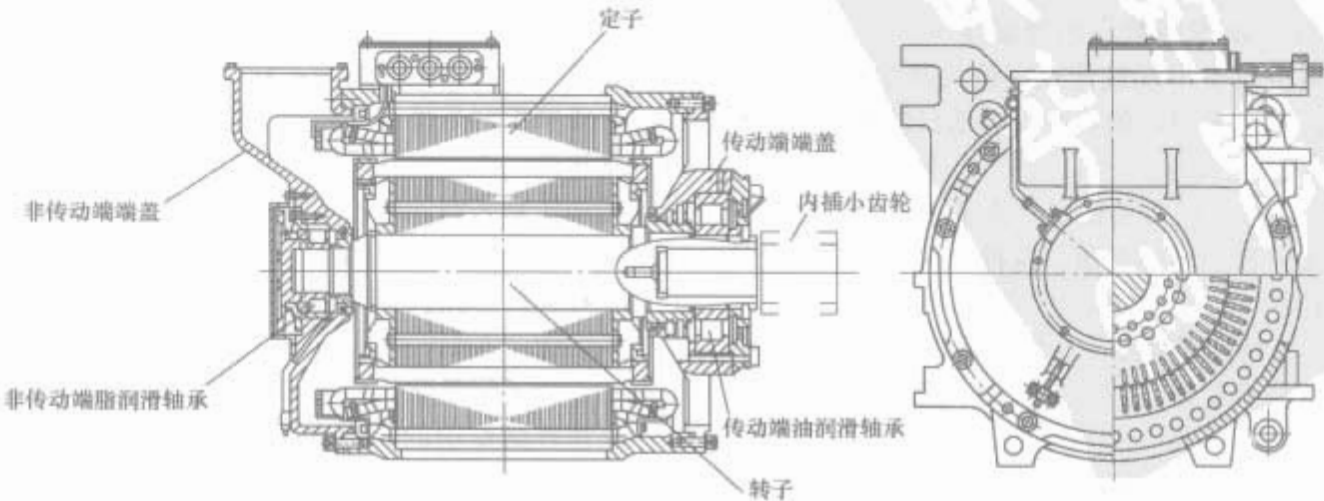


图 2.3-112 货运机车异步牵引电动机总装图

非传动端端盖为了轻量化一般采用高强度铝质端盖。轴承采用铁路专用的高寿命轴承。试验证明，非传动端轴承采用优质油脂 UPG2 可以有效提高轴承寿命和油脂油寿。传动端端盖一般采用钢质端盖，传动端轴承采用优质油润滑，润滑油由齿轮箱进入轴承盖的进油口上面的滤油板，它排除颗粒直径较大的杂质，轴承盖内有储油环，它沉淀颗粒直径较小的金属磨屑，润滑油通过出油孔流向轴承，见图 2.3-99。运行实践证明，磨屑和积碳形成的油腻可以堵住出油口。GT220 可以减少金属件的正常磨损及润滑油分解产生的积炭，消除油腻，有效提高轴承寿命和油寿，轴承装配要求非常严格。特别要注意，电动机装配完成后要先在低速下试运转，以便建立充分润滑的油膜。

3.4.6.3 货运机车异步牵引电动机

图 2.3-112 所示为货运机车异步牵引电动机总装图。

非传动端端盖为了轻量化一般采用高强度铝质端盖，轴承采用铁路专用的高寿命绝缘轴承。试验证明，非传动端轴承采用优质油脂 UPG2 可以有效提高轴承寿命和油脂油寿。传动端端盖一般采用钢质端盖，传动端轴承采用优质油润滑，试验证明，GT220 可以减少磨损，有效提高轴承寿命和油寿，轴承装配要求非常严格。特别要注意，电动机装配完成后要先在低速下试运转，以便建立充分润滑的油膜；齿轮、齿轮箱和轴承盖储油环的清洁度有严格要求。润滑油选择不当，它产生的积炭和金属磨屑混合在一起形成的油腻会堵住油路的通道。润滑油选择不当，如与水分子相溶的润滑油，也将造成轴承的严重磨损。

3.4.7 试验

我国异步牵引电动机试验分例行试验、型式试验、综合试验和研究性试验 4 种，根据用户要求由该产品的技术条件具体规定试验项目。

3.4.7.1 例行试验

例行试验是用来验证每台电动机已正确组装，能够承受相应的耐电压试验，并且在机械和电气方面处于良好的工作状态。由工频电源供电。

通常，每台电动机都要进行下列规定的例行试验：

- (1) 电动机转动、外观、外形尺寸及安装尺寸检查。

- (2) 测定绕组在实际冷态下的直流电阻。
- (3) 空载试验。
- (4) 堵转试验。
- (5) 超速试验。
- (6) 测定定子绕组对机座的绝缘电阻。
- (7) 定子绕组对机座的耐电压试验。
- (8) 定子绕组匝间耐电压试验。
- (9) 振动测定。

在订货前，用户与制造厂可以协商采取另一种替代试验方法。例如，对于在严格的质量保证措施情况下大批量生产的电动机，可以采取以下两种方法中的一种：第 1 种，当对所有电动机均作例行试验时，允许减少例行试验项目；第 2 种，从订货产品中随机抽出一定比例的电动机进行全部项目的试验，但每台电动机均需要进行空载、堵转、对地和绕组间耐电压 4 项试验。

3.4.7.2 型式试验

型式试验用来验证新型电动机的定额、特性和性能。对于每一种新的设计，至少要选取一台作试验。型式试验规定电动机必须在配套的逆变器供电下进行特性和温升试验，不能采用通用逆变器供电，否则试验视为无效。

- 型式试验包括全部例行试验项目，需要进行以下试验：
- (1) 温升试验（配套的逆变器供电）按以下定额进行：
 - 1) 连续定额；
 - 2) 小时等效定额。
 - (2) 特性曲线测定和绘制（配套的逆变器供电）。
 - (3) 空载特性（工频电源时空载电流和损耗的测定）。
 - (4) 堵转特性（工频电源时堵转电流和损耗的测定）。
 - (5) 噪声测定。
 - (6) 湿热试验。
 - (7) 耐振强度试验（仅适用于新产品试验完成时）。
 - (8) 称重（仅适用于新产品试验完成时）。

3.4.7.3 综合试验

指异步牵引电动机必须与其配套的逆变器和逆变器的控制系统进行联合试验。

- (1) 对于并联异步电动机的特殊条件。

1) 总则。当几台异步电动机并联由单台逆变器供电时，轮径的偏差会使某些电动机在其最恶劣的负载情况下工作（情况 1）。控制系统也可以这样设计：可以通过降低牵引力的方式，使所有电动机均保持在没有轮径失配时的负荷以内（情况 2）。可见，轮径失配的结果将影响转矩特性或电动机的温升，或同时影响这两者。轮径的最大允许偏差应由用户和制造商双方商定。

特性和温升试验应按不存在轮径失配的情况来做。

如果所设计的控制装置会使某些电动机工作在其最恶劣的负载情况下（情况 1），则应作电动机的附加温升试验。如果设计的控制装置通过降低牵引力使所有的电动机均保持在某个工作载荷内（情况 2），只要用户和制造商双方同意，则可以作附加转矩特性试验。

2) 附加试验。附加试验的条件以用户和制造商双方的协议为依据：

- 对于情况 2，只能作全套试验；

对于情况 1，只对单台电动机在全套试验和温升试验两者之中选择一种做试验。

① 全套试验。并联电动机应由单台逆变器供电。除非另有规定，除一台电动机加载到对应于最大允许轮径失配量的转速外，其余电动机均应加载到具有正常轮径时的转速。

② 单台电动机的温升试验。除非另有规定，应认为本试验中仅单台电动机运转着一个具有最大轮径失配量的轮对。由于轮径的失配，控制的基准值应加以修正，使得转差率对应于最恶劣负载条件。轮径失配时转差率变化对转矩特性影响。轮径失配时的转差率 s_L

$$s_L = s \pm (\Delta D/D) [(n-1)/n]$$

式中： s （标么值）为特性试验期间所测量到的电动机热态转差率； n 为并联电动机台数； $\Delta D/D$ （标么值）为最大轮径失配量，“+”为牵引，“-”为制动）。

对于所有有制动工作方式的应用，由于在最恶劣负载条件下增大了持续定额，均应进行温升试验。这足以表明电动机对其系统（主要是机车）是相适应的。

假如没有制动工作方式，则应按规定的工作周期达到最高温度条件进行温升试验。这就考虑了牵引时的大负载和制动时的低负载情况（主要对于重载运输应用而言）。

- (2) 综合试验项目。

综合试验项目见表 2.3-39。

表 2.3-39 综合试验项目			
试 验 项 目	型式试验	研究性试验	可能与 TB/T3001 和 IEC 61287—1 重复的试验
温升试验	√		√
并联电动机	如有应用		
附加试验	如有应用		
特性	√		
转矩	√		
电动机热态的转矩特性	√		√
电动机冷态的转矩特性	√		
满转矩的全转速范围试验	√		
效率特性	可选		√
并联电动机	如有应用		√
附加试验	如有应用		√
其他试验	保护系统试验		
	控制装置的电源	√	
	直流电源	√	
	其他试验		√
	输入电流中的谐波		√

3.4.7.4 研究性试验

研究性试验是为了获得补充资料而进行的非强制性特殊试验，仅用在用户向制造厂订购该电动机之前。这对我国目前特别需要，需要进行可靠性方面的补充试验，试验项目由用户与制造厂签订研究性试验协议规定。试验结果不应影响电动机的验收。

4 同步牵引发电机

内燃机车的牵引发电机有直流发电机和同步牵引发电机 2 类，它们与柴油机组组成发电机组供电给牵引电动机，组成内燃机车的电传动系统。

(1) 直流发电机。早期的内燃机车如 DF 型、DF2 型、DF3 型等采用直—直流电传动系统，牵引发电机为 ZQFR-1350 直流牵引发电机。由于直流牵引发电机不仅结构复杂，体积和质量都较大，而且随着内燃机车装车功率的增加，受到机械强度、换向与温升等诸多限制，直流发电机已不再适用。目前，内燃机车的牵引发电机均采用同步牵引发电机。

(2) 同步牵引发发电机。从 DF4 型开始的 DF 系列等内燃机车,采用交一直流电传动系统,牵引发发电机大多为 TQFR-3000 系列的同步牵引发发电机。励磁方式由专用的感应子励磁机励磁,感应子励磁机发出的三相交流电经整流后通过同步牵引发发电机的集电环向同步发电机的励磁绕组提供励磁电流。在部分内燃机车中,采用无刷励磁同步发电机。

目前,国外内燃机车大多采用交一直一交电传动系统。我国在 1999 年也开发出第一台国产 NJ₁ 型交流传动内燃机车,以后又相继开发了 DF_{4DJ}、DF_{8BJ} 交流传动内燃机车,牵引发发电机均为无刷励磁同步发电机。例如,NJ₁ 型交流传动内燃机车同步发电机为 JF208S 无刷励磁同步发电机,DF_{8BJ} 交流传动内燃机车同步发电机为容量达到 4000kVA 的 JF220 无刷励磁同步发电机。

4.1 同步牵引发发电机的运用

随着内燃机车装车功率的增加,大功率硅整流装置的普遍应用和交流传动技术的发展,牵引同步发电机显示出巨大的优越性。牵引同步发电机的电枢布置在定子上,电枢绕组切割气隙磁通感应出交流电,同时因为它没有换向器,因此,在电磁方面和机械方面的限制就少得多,输出功率能做到很大;而且质量小、效率高、调压范围广和调节性能好、维护与检修方便。在交一直流电传动系统中,由于同步牵引发发电机能够输出高电压和大电流,经三相桥式硅整流器整流后,供电给直流牵引电动机,便于各台直流牵引电动机采用全并联运行,有利于牵引电动机的负载均衡和机车的黏着利用。它所具有的广阔调压范围可以减少或取消直流牵引电动机磁场削弱的级数,有利于直流牵引电动机高速时的换向。

在交一直一交电传动系统中,柴油机拖动同步牵引发发电机发电,通过牵引变频装置,使三相交流牵引电动机获得理想的平滑的牵引调速性能。因此,无论是从制造、运用、维修和发展来看,内燃机车主发电机采用同步发电机成为必然的选择。

自从 1971 年德国 Henschel 公司和 BBC 公司首次研制成功交一直一交电传动系统以来,20 世纪 80 年代内燃机车的发展达到一个新的时代——内燃机车的微机控制和交流电力传动的时代。在交一直一交电传动技术日趋成熟并不断发展的基础上,美欧等经济技术发达国家开始进行单机大功率内燃机车的研制。GE 公司 1997 年批量生产的 AC6000 型交流内燃机车单机功率为 4661kW (6250hp)。GM 公司同年生产出 SD90MAC 型交流内燃机车,单机功率达 4772kW (6400 hp)。我国 2002 年生产的 DF8BJ 交流内燃机车装车功率为 3728.5 kW (5000 hp)。

根据“货运重载、客运提速”的方针及铁路发展的远景目标,我国近年来开发了一系列新型内燃机车,需要开发出更大功率的同步牵引发发电机,以提高可靠性,便于维护。随着比功率的提高,要采用耐热等级更高的绝缘系统。采用同轴的带旋转整流器的交流无刷励磁机,可实现无刷化,使机电能量变换过程中没有滑动接触的导电过程,使运行更加可靠。我国近年所开发的交一直一交电传动内燃机车均采用无刷励磁的同步牵引发发电机,如 NJ₁、DF_{8BJ} (NJ₂)、DF_{4DJ} 交一直一交电传动内燃机车分别采用 JF208S、JF220、JF216 无刷励磁牵引同步发电机,JF220、JF216 定、转子绝缘等级均为 H/H。

同步牵引发发电机运行的环境条件按照 TB/T 2436—2006《电力牵引铁路机车车辆和公路车辆用除电子变流器供电的交流电动机之外的旋转电机》,发电机应能在下列环境下正

常运行:

- (1) 海拔不超过 1200m;
- (2) 最高环境空气温度为 40℃ (遮阴处)。

4.2 主要参数

同步牵引发发电机是用于对同一机车的直流电动机或交流牵引电动机供电的同步发电机,受到体积和质量的限制和与牵引电动机技术参数的匹配,其性能参数的选择与一般同步发电机有所不同,而且交一直电传动与交一直一交电传动系统其性能参数的选择也有不同的要求。

4.2.1 电压的选择

对于交一直流电传动内燃机车同步牵引发发电机,通常有两个连续定额,并符合规定的满功率调整曲线。在满功率调整曲线上,两个连续定额点中间的所有点均可连续工作。两个连续定额分别为低电压连续定额和高电压连续定额。低电压连续定额通常是由通过负载电流的所有绕组的温升确定,此时发电机具有较大的负载电流和较低的电压;高电压连续定额通常是由磁场绕组的温升确定,此时发电机具有较小的负载电流和较高的电压。由于同步发电机通过三相桥式全波整流后供电给直流牵引电动机,在理想状况下 ($\cos\varphi=1$),整流前后的电压关系为

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_n = 2.34 U_n = 1.35 U \quad (2.3-172)$$

式中: U_d 为直流输出端的平均电压, V; U_n 为发电机相电压有效值, V; U 为发电机线电压有效值, V。

实际情况与理想状况有较大差异,并且受到电机负载的影响,交流与直流侧的电压比值与式 (2.3-172) 有差异。高电压连续定额点的电压根据直流侧直流牵引电动机的最高电压确定。低电压连续定额点的电压根据直流侧直流牵引电动机的额定电压确定。电压比值近似取 1.26 (换相角按 $\pi/6$ 考虑),也即发电机高电压连续定额点的电压

$$U_{\max} = \frac{U_{d\max}}{1.26} \quad (2.3-173)$$

式中: U_{\max} 为发电机高电压定额点的电压, V; $U_{d\max}$ 为直流牵引电动机的最高电压, V。

发电机低电压连续定额点的电压为

$$U_{\min} = \frac{U_{dN}}{1.26} \quad (2.3-174)$$

式中: U_{\min} 为发电机低电压定额点的电压, V; U_{dN} 为直流牵引电动机的额定电压, V。

如果发电机能够做到调压范围更广,则可以将发电机的高电压定额点设计得更高,而低电压定额点设计得更低。

对于交一直一交电传动内燃机车牵引同步发电机,电压的选择受到牵引逆变器中间直流环节电压的限制。取牵引同步发电机额定电压等于交流牵引电动机的额定电压,也即等于牵引逆变器的额定输出交流电压。

4.2.2 电流的选择

对于交一直电传动内燃机车牵引同步发电机,高电压连续定额点的电流按直流牵引电动机的最小恒功率电流选择,低电压连续定额点的电流按直流牵引电动机的额定电流选择。

TQFR-3000 同步牵引发发电机的电流是按理想状态整流前后的电流比值确定的,其值为

$$I_d = (\sqrt{3}/1.35) I_n = 1.283 I_n \quad (2.3-175)$$

式中: I_d 为直流输出端的平均电流, A; I 为发电机相电流有效值, A; η_k 为整流器效率。

TQFR-3000B 牵引同步发电机的电流是按换相角 $\pi/6$ 整

流前后的电流比值取 $\eta_k=0.975$ ， $I_d=1.25I$ 。

对于交—直—交电传动内燃机车，装车功率确定后，根据对牵引同步发电机的电压要求，其电流就可确定。

4.2.3 频率的选择

牵引同步发电机的磁极数目一般为 10~18 极，极数少时转子的结构较为简单，电枢铁心中的交变频率较低；但每极的磁通量较大，需要较大的转子轭部尺寸，频率范围一般选择 83.3~150Hz。随着内燃机车装车功率的增加和牵引同步发电机比功率的增加，多选择较高的频率。

4.2.4 绝缘等级

绝缘系统的耐热性能是决定电机容量、体积和使用寿命的主要因素。牵引同步发电机电磁负荷的设计要比一般同步发电机高，目前牵引同步发电机的定子与转子均采用较高耐热等级的绝缘材料，一般为 H/H 级的绝缘；同时为了尽量提高额定输出功率并减少体积质量，牺牲绝缘寿命而获得较好的经济指标，牵引同步发电机绝缘的温升限值高于一般同步发电机。

按照 TB/T 2436—2006 的规定，采用不同等级绝缘材料的绕组和其他部件，在试验台上测得的高于冷却空气温度的温升允许限值按表 2.3-40 取值。

表 2.3-40 牵引同步发电机各部件温升限值

电机部件	测量方法	绝缘等级			
		B	F	H	200
定子绕组或交流发电机或同步电动机的旋转磁场绕组	电阻法	130	155	180	200
所有其他旋转绕组	电阻法	120	140	160	180
换向器或集电环	电温度计法	120	120	120	120
阻尼绕组	电温度计法	温升应以不损害任何绕组或其他部件为限			

如果同一发电机的不同部件采用不同等级的绝缘材料，则每个部件的温升限值应取各个绝缘等级的对应值。

4.2.5 冷却方式

随着同步牵引发电机单机容量的日益增大，采用了较高的电磁负荷，损耗产生的热量通过通风冷却系统散发出去。牵引同步发电机采用结构简单的以空气为冷却介质的空气冷却方式。根据冷却空气的来源方式不同分为自通风和强迫通风 2 种。

4.2.5.1 自通风

自通风的同步牵引发电机如 TQFR-3000、JF220 等采用防护式径向自通风。定子铁心有径向通风道，转子磁轭支架两端装有刮板式风扇。冷却空气进入发电机后，大部分冷却空气由磁极间的间隙通过，排入定子径向通风道，小部分冷却空气冷却定子绕组端部，然后从机座的出风窗口，经管道排出车体之外。其特点是：不需附加专门设备，风路短，风阻小；但风量和风压随发电机的转速变化而变化，由于存在径向通风道，铁心轴向长度较长。

4.2.5.2 强迫通风

JF202、JF204D 等同步牵引发电机采用强迫通风。定子铁心不设径向通风道，通风机安装在冷却空气的入口端，将冷却空气吹入发电机内部，沿轴向流过。其特点是：送入发电机的冷却空气的风量和风压与发电机的转速无关，送入的风量较大，并可以调节；但需增设通风机组和送风管道，占有较多的空间位置。

4.2.6 产品数据汇总表

同步牵引发电机的主要技术数据见表 2.3-41。

表 2.3-41 同步牵引发电机的主要技术数据

参 数	TQFR-3000	TQFR-3000B	TQFR-3000E
额定容量(kVA)	3000	2570	2911
额定电压(V)	438/613	386/606	425/770
额定电流(A)	3936/2805	3840/2444	3955/2183
额定转速(r/min)	1100	1000	1000
额定频率(Hz)	165	150	150
额定功率因数	0.95	0.95	0.95
励磁方式	他励	他励	他励
额定励磁电压(V)	101/112	90/112	96/103
额定励磁电流(A)	244/272	213/267	251/268
绝缘等级(定子/转子)	F/F	F/F	H/H
冷却方式	径向自通风	径向自通风	径向自通风
气隙(mm)	3	3	2.7
15℃时电枢绕组线电阻(Ω)	0.001 16	0.001 16	0.001 596
15℃时励磁绕组电阻(Ω)	0.2437	0.263	0.263
转向(从集电环端看)	顺时针	顺时针	顺时针
定子铁心外径(mm)	1340	1340	1340
定子铁心内径(mm)	1140	1140	1140
定子铁心长度(mm)	360+10×8	390+10×8	390+10×8
定子槽数	108	108	108
定子每槽导体数	4	4	10
转子磁极数量	18	18	18
磁极每极匝数	26.5	28.5	28.5
总质量(kg)	4985	5100	5180

参 数	TQFR-3000Z	TQFR-3000ZG	JF202
额定容量(kVA)	2911	2866	2876
额定电压(V)	425/700	418/616	314/976
额定电流(A)	3955/2401	3958/2686	5288/1730
额定转速(r/min)	1000	1000	1000
额定频率(Hz)	150	150	83.3
额定功率因数	0.95	0.95	0.95
励磁方式	他励	他励	他励
额定励磁电压(V)			
额定励磁电流(A)			
绝缘等级(定子/转子)	F/H	F/H	H/H
冷却方式	径向自通风	径向自通风	轴向外通风
气隙(mm)	2.7	3	4.8
15℃时电枢绕组线电阻(Ω)	0.001 596	0.001 436	0.000 817
15℃时励磁绕组电阻(Ω)	0.263	0.2437	0.1021
转向(从集电环端看)	顺时针	顺时针	顺时针
定子铁心外径(mm)	1340	1340	1450
定子铁心内径(mm)	1140	1140	1096
定子铁心长度(mm)	340+10×10	360+10×8	500
定子槽数	108	108	90
定子每槽导体数	10	8	6
转子磁极数量	18	18	10
磁极每极匝数	28.5	26.5	35
总质量(kg)	5000	5000	7914

续表			
参 数	JF204D	JF208A	JF208C
额定容量(kVA)	3700	2911	2570
额定电压(V)	540/770	425/770	386/606
额定电流(A)	3955/2775	3955/2183	3840/2444
额定转速(r/min)	1000	1000	1000
额定频率(Hz)	116.7	150	150
额定功率因数	0.95	0.95	0.95
励磁方式	他励	无刷励磁	无刷励磁
额定励磁电压(V)			
额定励磁电流(A)			
绝缘等级(定子/转子)	H/H	H/H	F/F
冷却方式	轴向外通风	径向自通风	径向自通风
气隙(mm)	4	2.7	3
15℃时电枢绕组线电阻(Ω)	0.001 32	0.001 596	0.001 16
15℃时励磁绕组电阻(Ω)	0.1533	0.263	0.263
转向(从柴油机端看)	逆时针	逆时针	逆时针
定子铁心外径(mm)	1444	1340	1340
定子铁心内径(mm)	1180	1140	1140
定子铁心长度(mm)	430	390+10×8	390+10×8
定子槽数	126	108	108
定子每槽导体数	6	10	4
转子磁极数量	14	18	18
磁极每极匝数	30	28.5	28.5
总质量(kg)	6032	5615	5615

参 数	JF208S	JF216	JF220
额定容量(kVA)	2170	3000	4000
额定电压(V)	1170	2030	2030
额定电流(A)	1070	2×427	2×570
额定转速(r/min)	1000	1000	1000
额定频率(Hz)	150		150
额定功率因数			0.98
励磁方式	无刷励磁	无刷励磁	无刷励磁
额定励磁电压(V)			
额定励磁电流(A)			
绝缘等级(定子/转子)	H/H	H/H	H/H
冷却方式	径向自通风	径向自通风	径向自通风
气隙(mm)			2.7
15℃时电枢绕组线电阻(Ω)			0.001 41
15℃时励磁绕组电阻(Ω)			0.431
转向(从柴油机端看)	逆时针		逆时针
定子铁心外径(mm)			1340
定子铁心内径(mm)			1140
定子铁心长度(mm)			340+10×8
定子槽数	108		108
定子每槽导体数			10
转子磁极数量		18	18
磁极每极匝数			37.5
总质量(kg)	5500		5160

4.3 同步牵引发电机的励磁

同步牵引发电机为了建立空载电压，需要一个空载励磁电流；而在负载时，为了补偿负载电枢反应的去磁作用及内阻抗压降，以保持发电机的端电压不变，就需要补充一个负载励磁电流分量，这就需要由励磁机提供励磁电流。在内燃机车中为了适应同步牵引发电机恒功率调节运行的需要，配有能自动调节励磁的励磁机系统。早期曾经采用直流励磁机。但为了能获得更方便、准确和可靠的励磁，现在多采用性能可靠的感应子励磁机。随着电子技术的发展，无刷励磁方式得到广泛应用，近年来所开发的内燃机车发电机已趋向于采用交流无刷励磁机。

4.3.1 直流励磁机

直流励磁机是一种带换向器的旋转电枢式发电机，多相闭合的电枢绕组切割定子磁场产生多相交流电，由换向器和电刷所组成的整流系统的整流作用，在电刷上获得直流电，再通过同步牵引发电机的电刷、集电环将获得的直流电流输送到同步牵引发电机的转子励磁绕组去励磁。ND5 型内燃机车就采用了 5GY-27M 型直流复励励磁机。

4.3.2 感应子励磁机

感应子励磁机是三相异极式交流发电机，定子铁心冲片上冲制有大槽和小槽，大槽中放置直流励磁绕组，小槽中放置三相电枢绕组。转子铁心由齿形冲片叠压而成，转子上没有任何绕组。在 DF 系列内燃机车上广泛应用 GQL-45 型感应子励磁机，其基本结构见图 2.3-113，接线原理图见图 2.3-114，在一个极下的电枢绕组展开图见图 2.3-115。电机气隙中的主磁场是通入直流电流的励磁绕组建立的。当转子匀

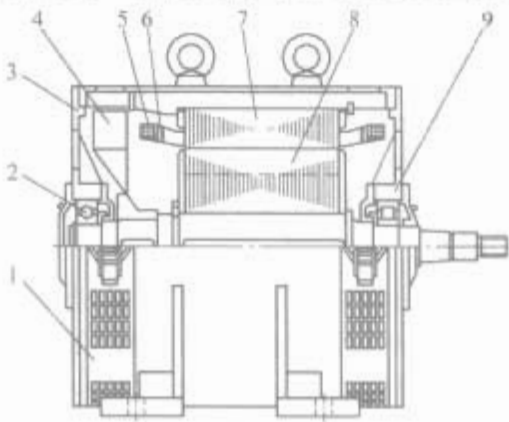


图 2.3-113 GQL-45 型感应子励磁机结构
1—护罩；2—轴（3E313）；3—端盖；4—风扇；5—励磁绕组；
6—电枢绕组；7—定子铁心；8—转子；9—轴承（3E32313）

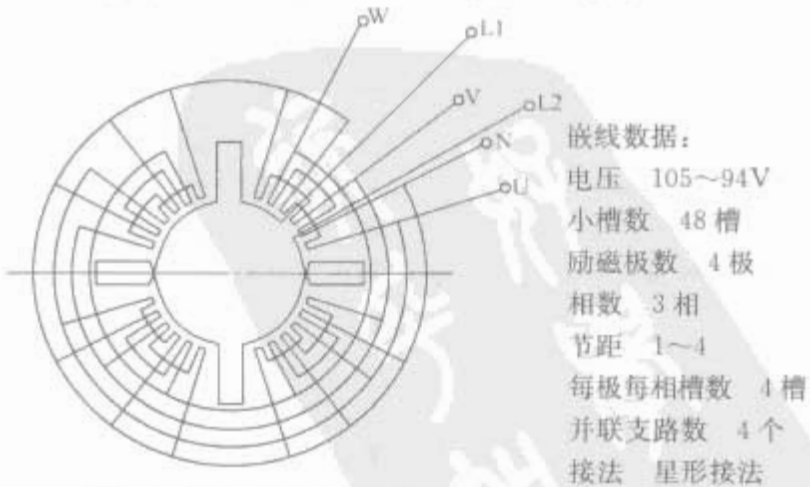


图 2.3-114 GQL-45 型感应子励磁机接线原理

速旋转时，由于转子齿部分的磁导大，与磁导成正比的主磁通大部分从转子齿中通过，而转子槽部分的磁导小，只有很少一部分磁通从转子槽中通过，故气隙磁导将产生周期性的

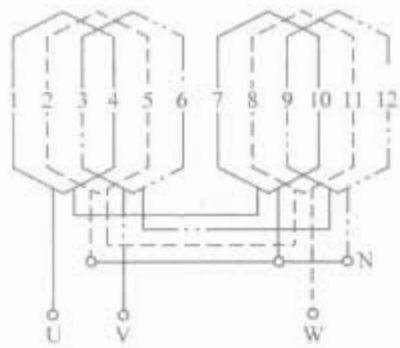


图 2.3-115 GQL-45 型感应子励磁机
一个极下电枢绕组展开图

变化。GQL-45 型感应子励磁机磁路示意图 2.3-116，气隙磁通的变化如图 2.3-117 所示。



图 2.3-116 GQL-45 型感应子励磁机磁路示意

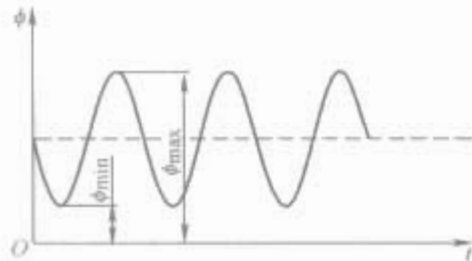


图 2.3-117 气隙磁场波形

此时，可以近似地把气隙磁通看成是由 2 个分量合成的：一部分是不变的恒定分量，另一部分是交变分量。由于磁通恒定分量的大小和方向都是不变的，不能在电枢绕组中感应出交变电动势；而磁通的交变分量将在三相电枢绕组中感应出周期性近似正弦形的交变电动势。可以把转子铁心上的每对齿槽等效看作每对磁极，即转子铁心上的齿槽对数为 Z_2 时，磁极对数 $P_2 = Z_2$ ，电枢绕组中感应电动势的频率 f_1 可表示为

$$f_1 = \frac{P_2 n}{60} = \frac{Z_2 n}{60} \tag{2.3-176}$$

式中： n 为感应子励磁机的转速，r/min。

感应子励磁机电枢每相绕组的空载感应电动势为

$$\begin{aligned} E_0 &= 4.44 f_1 W_1 K_{dp} K_b \frac{(\Phi_{max} - \Phi_{min})}{2} \\ &= 2.22 f_1 W_1 K_{dp} K_b (\Phi_{max} - \Phi_{min}) \quad (V) \end{aligned} \tag{2.3-177}$$

$$K_{dp} = K_d K_p$$

式中： W_1 为电枢绕组每相串联匝数； K_b 为磁场波形系数； K_{dp} 为电枢绕组的绕组系数； K_d 为绕组的分布系数； K_p 为绕组的短距系数； Φ_{max} 与 Φ_{min} 为转子齿槽分别与电枢绕组中心线对应时的最大与最小磁通，Wb。

感应子励磁机取消了电刷和集电环装置，转子上没有任何绕组，大大减少了励磁机故障的产生。但感应子励磁机在理想的状态下（假设槽部 Φ_{min} 为 0），齿槽交变磁通幅值变化的利用率也只有通常同步发电机的一半，而实际利用率往

往只有 35%~45%，且转子铁心齿部磁通又易饱和。以 GQL-45 感应子励磁机转子铁心 12 对齿槽为例，当以额定转速 2625r/min 旋转时，电枢电动势的频率 $f_1 = 525\text{Hz}$ ，因此，铁心铁损耗较高。为增大磁通的利用率，降低铁损，要求磁路不饱和，则需要更多的导磁材料，硅钢片用量较多，发电机质量也较大，并且感应子励磁机输出电流波形的正弦性也比通常的同步发电机差。

4.3.3 交流无刷励磁机

交流无刷励磁机是带有旋转整流器的转枢式同步发电机，电枢与旋转整流器安装在牵引同步发电机的轴上，装有励磁绕组的定子固定在发电机端盖上。当励磁机的励磁绕组通一直流电流建立磁场后，与主发电机同轴旋转的交流励磁机电枢感应出的三相交流电经旋转整流器的三相全波整流成直流后直接输入主发电机的励磁绕组。其特点是：无滑动接触部分，维护简单；无旋转接触的导电部分，不会产生火花；大大地减少了励磁机的故障。

4.4 设计特点

同步牵引发电机是根据电磁感应原理制造的将机械能转变为电能的旋转发电机。定子铁心嵌有三相对称的电枢绕组，电机的转子铁心装有励磁绕组。当柴油机拖动转子旋转时，励磁绕组中通入直流电流产生磁场。电枢绕组与转子磁场之间产生相对运动，根据电磁感应原理在电枢绕组中感应出电动势。感应电动势的大小为

$$e = B_\delta L v \quad (V) \tag{2.3-178}$$

式中： B_δ 为电枢绕组中导体所在处的磁通密度，T； L 为磁场中导体的轴向长度，m； v 为导体与 B_δ 之间的相对线速度，m/s。

由于电枢绕组的导体不断交替并处于不同极性的磁极下，感应电动势的方向也是交变的，感应电动势的频率 f 与磁极对数 p 、转子转速 n 存在固定关系，即

$$f = \frac{pn}{60} \quad (\text{Hz}) \tag{2.3-179}$$

式中： p 为磁极对数； n 为转子转速，r/min。

当发电机带上对称的负载后，定子三相对称绕组中流过三相对称交流电流。这个三相对称交流电流产生一个旋转的电枢磁场，电枢磁场对转子磁场的影响称为电枢反应，如果负载为电感或电阻负载，电枢反应对转子磁场起去磁作用，并造成转子磁场的畸变。当发电机加上负载后，随负载变化的发电机端电压的变化就是发电机的外特性。维持端电压不变，调节发电机的励磁电流，就是发电机的调节特性。

4.4.1 主要尺寸的确定

对于旋转磁极式同步牵引发电机，主要尺寸指定子内径 D_{il} 和定子铁心的计算长度 l_{ef} 。主要尺寸关系式与异步发电机相同，即

$$\frac{D_{il}^2 l_{ef} n}{P'} = \frac{6.1 \times 10^3}{\alpha'_p K_{wm} K_{dp} A B_\delta} \tag{2.3-180}$$

式中： n 为发电机转速，r/min； P' 为发电机的计算功率，kW·A； α'_p 为计算极弧系数，可近似地认为 $\alpha'_p = 0.7$ ； K_{wm} 为电动势波形系数，设计时尽量使电动势波形接近正弦，可认为 $K_{wm} = 1.11$ ； K_{dp} 为定子绕组系数，近似地认为 $K_{dp} = 0.925$ ； A 为电负荷，A/m； B_δ 为气隙磁密，T。

在选定电磁负荷 A 和 B_δ 后，就可初步确定电机的 $D_{il}^2 l_{ef}$ 。但 $D_{il}^2 l_{ef}$ 相同的电机既可以设计成细长的，也可设计为粗短的。电机几何形状关系用长径比 $\lambda = l_{ef} / \tau$ 来表示， τ 为极距，即

τ=πD₁₁ / 2p (2.3-181)

λ 值的选择通常应考虑电机的通风、转子的机械强度、转动惯量的要求，一般的同步电机，其 λ=0.6~2.5，同步牵引发电机统计数据 λ 值则多在 1.5~2 之间，且有关系式

n=60f / P (2.3-182)

l_{ef}=λτ=λ πD₁₁ / 2P (2.3-183)

将式 (2.3-182)、式 (2.3-183) 及 α_p、K_{wm}、K_{dp} 各系数代入式 (2.3-180)，整理得到定子内径的预估值为

D₁₁=4.48 √[3P'P² / λfAB_δ] (2.3-184)

定子外径可近似地估计为

D₁≈D₁₁+τ (2.3-185)

由于 λ 的合理取值可在一定的范围内变动，得到的定子外径 D₁ 可参照已有的产品和考虑硅钢片的利用率选取合适的尺寸，再推回去修正 D₁₁、λ，求出 l_{ef}。

4.4.2 气隙长度的确定

气隙长度 δ 是同步电机的重要尺寸，是影响电机技术经济指标的重要因素，与电机性能有很大关系。一般标准的同步电机是从静态过载能力出发，用与静态过载能力成反比的直轴同步电抗 x_d 估算气隙长度 δ。直轴同步电抗 x_d 的标么值 x_d^{*} 在 1.0~1.6 范围内选取，气隙长度 δ 近似地简化为

δ≥0.4Aτ / x_d^{*}B_δ × 10⁻⁶ (2.3-186)

在交一直流传动的内燃机车中，牵引同步发电机通常有低电压连续定额和高电压连续定额 2 个连续定额，直轴同步电抗标么值 x_d^{*} 已大大地超出 1.0~1.6 的范围，不能直接采用式 (2.3-186) 估算气隙长度 δ，可根据其极距 τ 按表 2.3-42 选择合适的气隙长度 δ。

表 2.3-42 气 隙 长 度

τ (cm)	15	20	30	40
δ (mm)	2.5~3.0	2.5~4.0	4.5~6.0	7~10

又因同步牵引发电机极数多，极距 τ 值小，以较高的频率 f 运行，δ 按表 2.3-42 中相应的较大值选取。还应从机械和安装的角度考虑，应使

δ≥0.15(1+D₁₁² × 10⁻¹) × 10⁻² (2.3-187)

为使气隙磁场波形尽量的接近正弦，通常把磁极极靴外表面做成与定子铁心内圆不同心的圆弧形，磁极中心部位气隙 δ 最小，沿极靴表面向两边逐步增大，极靴边上气隙最大，为 δ_{max}。一般认为，当 δ_{max}/δ=1.5 时磁场波形最接近正弦。

4.4.3 电磁负荷的选择

电磁负荷的选择对电机的参数及运行性能有直接的影响，一般的凸极同步发电机的电负荷 A 通常在 30000~50000A/m 之间选取，也可按经验公式选取，即

A=(220-280) (S_n / 2p)^{0.118} × 10² (2.3-188)

式中：S_n 为额定容量，kVA；p 为磁极对数。

磁负荷 B_δ 通常取 0.7~0.85T。

因同步牵引发电机比功率更大，采用了高耐热等级的绝缘和比一般电机高的温升限值，电磁负荷取得比一般电机高。交一直电传动内燃机车的主发电机在满功率调整曲线上高电压连续定额点的磁负荷 B_δ 较高，低电压连续定额点电负荷 A 较高。同时为满足柴油机恒功率运行的要求，必须

对主发电机的外特性进行调整，设计时要使磁路比较饱和，主发电机有较强的电枢反应，自然外特性负载后具有陡降性，一般磁负荷取 1T 左右。

低电压连续定额点电负荷 A 取 65000A/m 左右。交一直一交电传动内燃机车的发电机一般也按上述数值选取。电枢绕组的电流密度一般为 10A/mm²。

具体选择电磁负荷时，还应综合考虑电机绝缘等级、冷却条件、导电与导磁材料的性能、转速、容量等因素，并参考以往电机设计和试验、运行等长期积累的经验数据来确定电磁负荷的大小。

4.4.4 特性计算

同步发电机在转速保持恒定、负载功率因数不变的情况下，有 3 个主要变量：定子端电压 U、负载电流 I 和励磁电流 i_f。3 个量之间的函数关系就是同步发电机的运行特性。通常，同步发电机有下列 5 种基本特性：

(1) 空载特性。当 I=0 时，即发电机空载，空载电动势 E₀（即端电压 U₀）和励磁电流 i_f 之间的关系曲线为 U₀=f(i_f)。

(2) 负载特性。当 I=常数，cosφ=常数时，端电压和励磁电流之间的关系曲线为 U=f(i_f)。

(3) 短路特性。当 U=0 时，发电机短路电流 I_k 和励磁电流 i_f 之间的关系曲线为 I_k=f(i_f)。

(4) 外特性。当 i_f=常数，cosφ=常数时，端电压 U 和负载电流 I 之间的关系曲线为 U=f(I)。

(5) 调整特性。当 U=常数，cosφ=常数时，励磁电流 i_f 对负载电流 I 的关系曲线为 i_f=f(I)。

在交一直电传动内燃机车上，为了在实际运行中充分利用柴油机各挡的功率，同步牵引发电机能在各挡位恒功率输出，即如果要求各挡位发电机输出功率 P=√3UIcosφ=常数，则要求同步发电机有恒功率调节外特性和恒功率调节调整特性。

4.4.4.1 空载特性和负载特性

同步发电机空载时，端电压 U₀ 等于其感应电动势 E₀，励磁电流 i_f 产生的磁场就是气隙磁场。所以空载特性 U₀=f(i_f) 与电机磁场的磁化曲线相似。负载时，考虑到电枢绕组的漏阻抗压降和电枢反应，负载特性曲线 U=f(i_f) 与空载特性曲线形状相近而向右平移。其空载和负载特性见图 2.3-118。

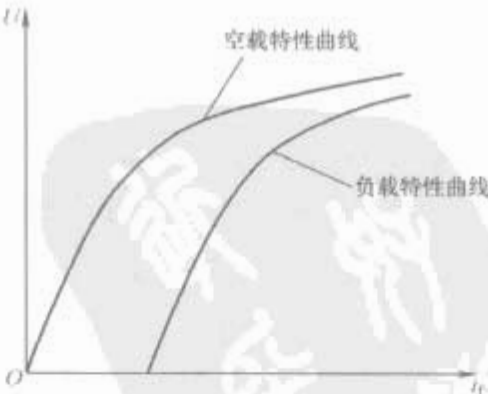


图 2.3-118 空载和负载特性曲线

空载特性的计算通常先给定电动势 E₁ 的值为 (0.55、0.8、0.9、1.0、1.1、1.25) U_{fn}，求出相应的磁通，分别进行磁路计算，求得相应磁动势，即得出空载特性曲线。空载特性曲线坐标一般用标么值表示，应以空载时得到的额定电压的励磁电流作为励磁电流的基值。

空载特性计算时，对气隙磁动势和电枢齿磁动势的计算中应考虑磁通分布在任何情况下都不是纯正弦分布，并且要

用进入极弧范围内的磁通计算气隙磁密和电枢齿磁密。因此，引入磁场的波形系数 K_Φ 和极靴磁通系数 K_λ ，即

$$K_\Phi = \Phi / \Phi_1 \quad (2.3-189)$$

$$K_\lambda = \Phi_\lambda / \Phi \quad (2.3-190)$$

式中： Φ 为气隙磁场每极的实际磁通，Wb； Φ_1 为气隙磁场每极的基波磁通，Wb； Φ_λ 为每极极弧范围内的磁通，Wb。

计算电枢齿磁动势时，当电枢齿部磁通密度小于 1.8T，由于齿的磁导率远大于槽的磁导率，一个齿距内的磁通几乎全部由齿通过。把这个齿磁密称作齿部的视在磁密 B'_t 。当 B'_t 小于 1.8T 时，可认为齿部实际磁密就等于视在磁密；而当 B'_t 大于 1.8T 时，因齿部高度饱和，磁导率显著下降，一部分磁通进入槽中，这时齿部实际磁密小于视在磁密，这种情况下要对齿部磁密进行修正。齿部磁密的饱和情况不同，电枢齿磁动势的计算方法也不同。

当电枢齿的视在磁通密度 $B'_t < 1.8\text{T}$ 时，同步牵引发机电枢槽形采用矩形槽，从齿顶到齿根部齿的宽度不相等，因此，沿齿高度方向各点的磁通密度和磁场强度不同。电枢齿的磁位降严格说来应用积分 $F_t = \int_0^{h_t} H_t dh$ 求出，计算比较复杂。所以可认为 $H_t = f(h)$ 的分布曲线为抛物线，用辛普生公式求得电枢齿的平均磁场强度 H_t 为

$$H_t = \frac{1}{6} (H_{tr} + 4H_{t1/2} + H_{tr}) \quad (2.3-191)$$

则电枢齿的磁位降 F_t 可按式(2.3-192)计算，即

$$F_t = \frac{1}{6} (H_{tr} + 4H_{t1/2} + H_{tr}) h \quad (2.3-192)$$

式中： H_{tr} 为电枢齿根部的磁场强度； $H_{t1/2}$ 为电枢齿高度 1/2 处的磁场强度； H_{tr} 为电枢齿顶部的磁场强度； h 为电枢齿的高度。

在电枢齿不太饱和以及齿的宽度沿齿的高度上变化不大时，可更简单地近似计算，也即用离齿最狭处 1/3 齿高截面的磁通密度 $B_{t1/3}$ 查出相应磁场强度 $H_{t1/3}$ ，电枢齿的磁位降按式(2.3-193)计算，即

$$F_t = H_{t1/3} h \quad (2.3-193)$$

当电枢齿的视在磁通密度 $B'_t > 1.8\text{T}$ 时，电枢齿任一截面处磁通密度 B_t 按式(2.3-194)确定，即

$$B_t = B'_t - 0.4\pi H_t K_s \times 10^{-6} \quad (\text{T}) \quad (2.3-194)$$

式中： K_s 为齿槽磁通分配系数。

对于矩形槽

$$K_s = \frac{b_s l_{ef}}{K_{fe} b_{t1/3} l'_t} \quad (2.3-195)$$

式中： b_s 为电枢矩形槽的宽度； l_{ef} 为电枢铁心等效长度； K_{fe} 为电枢铁心叠压系数； $b_{t1/3}$ 为距齿最狭处 1/3 齿高地方齿的宽度； l'_t 为电枢铁心总的净长度（不包括径向通风道）。

B_t 的计算式(2.3-194)表示实际齿磁密 B_t 与齿实际磁场强度 H_t 的函数关系，但 B_t 和 H_t 均是未知数，要求出 B_t 和 H_t 这两个未知数，必须找出 B_t 与 H_t 另外的函数关系，而电枢硅钢片的磁化曲线（见图 2.3-119） $B_t = f(H_t)$ 正是 B_t 与 H_t 的又一非线性函数关系。把这 2 个函数曲线联立求解，可确定 B_t 与 H_t 。计算 F_t 方法同前所述。

现在均采用微机进行辅助设计， B_t 和 H_t 的求取一般采用迭代法，用有限的步骤解出具有指定精确度的近似解。

电枢轭部磁动势的计算：因为轭部磁通沿轭部磁路路径

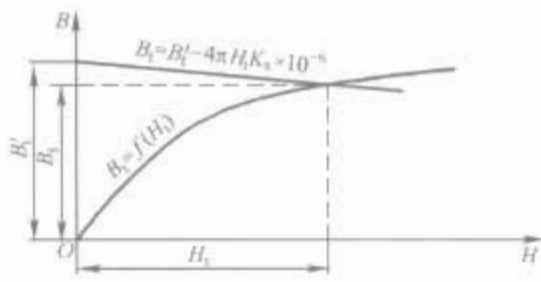


图 2.3-119 用图解法求电枢实际齿磁密和相应磁场强度

上的分布是不均匀的，轭部磁密是变化的，相应的磁场强度也是变化的。为简化计算，轭部磁通 B_{cl} 看作是不变的，磁路长度按轭部磁路的平均长度计算，计算出的磁动势比实际值要大，因此计算电枢轭部所需磁动势时要对轭部磁路进行修正。修正采用另一个较小的磁场强度值 H 的磁化曲线计算。

磁极磁动势考虑漏磁通，分别计算极身与极靴的漏磁系数。据此计算极身与极靴中磁密，由相应的磁场强度计算出磁极磁动势。

转子轭与磁极接缝处的磁动势按经验值，即 $F_{\alpha 2} = 500B_m$ 。 B_m 为极身的磁通密度，单位为 T。

一般牵引同步发电机的转子轭尺寸由机械强度决定，磁密很低，可不考虑转子轭的磁压降。

发电极每极的励磁磁动势等于上述各磁动势值之和。

空载特性曲线的测定是同步牵引发电机基本的试验项目之一，通过空载试验可以检查励磁系统的状况，电枢绕组连接正确与否和电机磁路的饱和程度。

4.4.4.2 短路特性

同步发电机的短路特性是转速 $n = \text{常数}$ ，三相电枢绕组出线端短路，端电压 $U = 0$ 时，电枢绕组短路电流 I_k 随励磁电流 i_f 变化的特性。由于电枢绕组电阻 R_a 比同步电抗 x_d 小得多，短路时忽略电阻压降，可认为短路电流 I_k 滞后空载电动势 E_0 为 90° 电角度。产生的电枢反应完全是直轴去磁作用，合成磁场处于不饱和状态，可得到

$$I_k = E_0 / x_d \quad (2.3-196)$$

短路特性曲线是一条通过原点的直线， I_k 与 i_f 成正比变化。短路特性曲线见图 2.3-120。



图 2.3-120 短路特性曲线

4.4.4.3 恒励磁自然外特性和恒功率调节外特性

外特性是在转速 n 等于常数和功率因数 $\cos \varphi$ 等于常数时，输出电压 U 与输出电流 I 的变化关系曲线。当励磁电流 i_f 等于常数而功率变化输出时，称为恒励磁自然外特性；而调节励磁电流 i_f 做到恒功率输出时，称为恒功率调节外特性。外特性反映了输出电压随输出电流变化的情况。恒励磁自然外特性和恒功率调节外特性曲线见图 2.3-121。

4.4.4.4 恒电压自然调整特性和恒功率调节调整特性

恒电压自然调整特性和恒功率调节调整特性是在转速 $n = \text{常数}$ 和功率因数 $\cos \varphi = \text{常数}$ 时，励磁电流 i_f 与输出电流

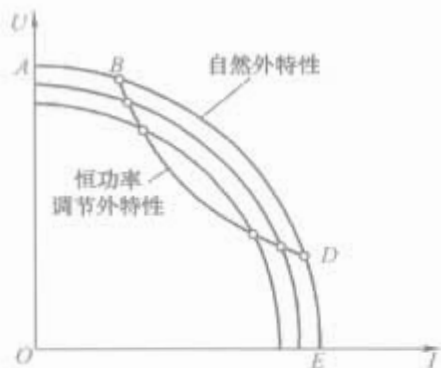


图 2.3-121 自然外特性与恒功率调节外特性曲线

I 的变化关系曲线。调整到输出电压 U 恒定，称为恒电压自然调整特性。而在内燃机车上是调整到输出功率恒定，称为恒功率调节调整特性。恒电压自然调整特性和恒功率调节调整特性见图 2.3-122。

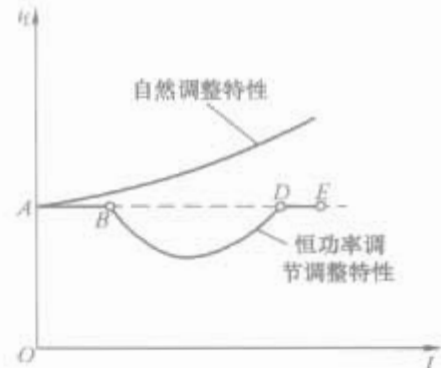


图 2.3-122 恒电压自然调整特性和恒功率调节调整特性曲线

4.4.4.5 效率特性

牵引同步发电机在将柴油机的机械能转为电能的同时，要产生损耗，损耗的存在造成能量损失，最终转化成热量，使电机的温升提高。牵引同步发电机功率一般都比较大大，因此降低损耗，提高电机效率很有意义。牵引同步发电机均采用凸极式转子结构，损耗分以下几类：

(1) 基本损耗。基本损耗包括基本铜耗和基本铁耗。基本铜耗包括负载电流在电枢绕组中产生的铜耗 P_{Cu} 和励磁电流在励磁绕组中产生的励磁损耗（电刷接触损耗在内） P_f 。损耗计算中的电阻值是直流电阻值，未考虑集肤效应引起的绕组中电流分布不均匀而使电阻增大的附加铜耗，因此称为基本铜耗。由于导线的电阻系数随温度的高低而变化，绕组电阻应折算到基准工作温度时的电阻值。基本铁耗 P_{Fe} 包括交变磁通在定子齿、轭中产生的磁滞损耗和涡流损耗。损耗主要与磁通密度、感应频率、定子冲片材料及厚度有关。

(2) 空载附加损耗。空载附加损耗 P_{tep} 的主要部分是磁极表面损耗。

(3) 负载附加损耗。负载附加损耗 P_{lx} 主要包括以下几部分：

- 1) 负载电流在电枢绕组端部附近的金属构件（齿压板、端盖等）产生的附加损耗，由于端部电流的空间分布比较复杂，临近端部的齿压板、端盖等形状各异，相距的距离不等，精确的计算较为困难，一般用经验公式计算。
 - 2) 定子磁场中齿谐波磁动势在磁极表面引起的附加损耗。
 - 3) 定子磁场中高次谐波磁动势在磁极表面引起的附加损耗。
 - 4) 三次谐波磁场在定子齿中产生的附加损耗。
 - 5) 漏磁场在电枢绕组中引起的附加损耗。
- (4) 机械损耗。机械损耗 P_{lw} 包括通风阻力损耗、轴承

和电刷的摩擦损耗，同样很难精确计算，实践中根据修正后的经验公式计算。

发电机的总损耗为各项损耗之和，即

$$\Sigma P = P_{Cu} + P_f + P_{tep} + P_{lx} + P_{lw} \quad (2.3-197)$$

发电机的效率特性为

$$\eta = f(P_1) = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1 + \Sigma P}\right) \times 100\% \quad (2.3-198)$$

式中： P_1 为发电机输出功率，kW。

通常发电机的效率在接近额定输出功率时最高，而在轻载时效率要低一些。

从运行角度看，以上特性中恒功率调节外特性和恒功率调节调整特性是最重要的。空载特性、负载特性、短路特性、效率特性则是检验与分析发电机基本性能的依据。

4.4.5 机械强度设计

牵引同步发电机应对下列零部件进行机械强度设计与计算：

- (1) 发电机机座的刚性强度。计算根据机座受力情况、机座材料的弹性模量、机座的惯性矩和机座截面的重心半径进行。现在多采用有限元分析软件 ANSYS 进行计算分析。
- (2) 转轴与转子支架过盈配合连接的计算。计算根据受力情况、转子支架轮箍材料的弹性模量、转子支架轮箍内外径和配合长度、配合面加工的表面粗糙度进行。
- (3) 转轴的刚性强度计算。
- (4) 磁极固定螺钉的应力计算。根据转子的最大超速、每个磁极的总质量、磁极所处位置的重心半径、每个磁极的螺钉数量和每个螺钉的最小断面积计算螺钉拉应力。

4.5 结构

目前国内内燃机车一般均采用中速柴油机，额定转速一般为 1000~1350r/min，牵引同步发电机基本结构为卧式单轴承结构的三相凸极同步发电机。转子轴法兰端与柴油机曲轴通过弹性联轴器相连，装置在同一底座上。另一侧轴伸为锥度结构。

单独励磁机他励的同步牵引发发电机如 TQFR-3000，在轴承端的端盖内侧装有刷架系统，集电环安装在轴上，刷杆固定在端盖上。其主要零部件结构如图 2.3-123 所示。

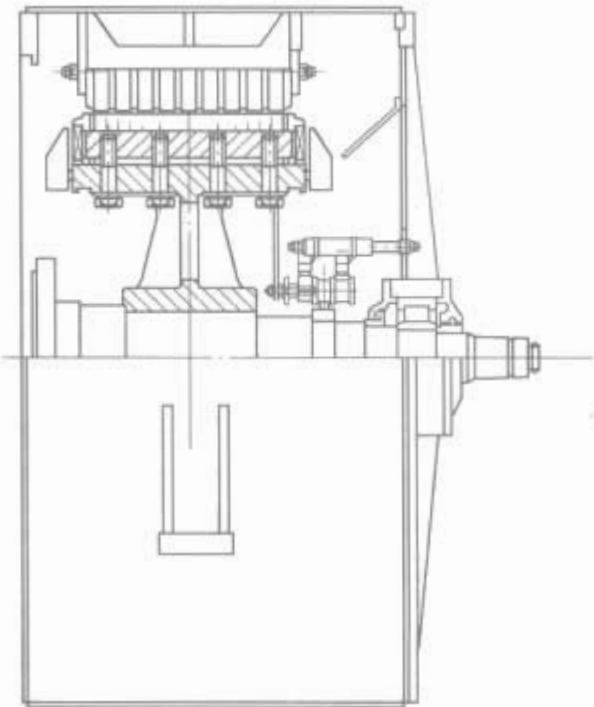


图 2.3-123 TQFR-3000 牵引同步发电机主要零部件

采用交流无刷励磁的同步牵引发电机如 JF220，在轴承端的端盖内侧装有交流励磁机和旋转整流器，交流励磁机的电枢和旋转整流器安装在轴上，嵌有励磁绕组的定子固定在端盖上。其主要零部件结构如图 2.3-124 所示。

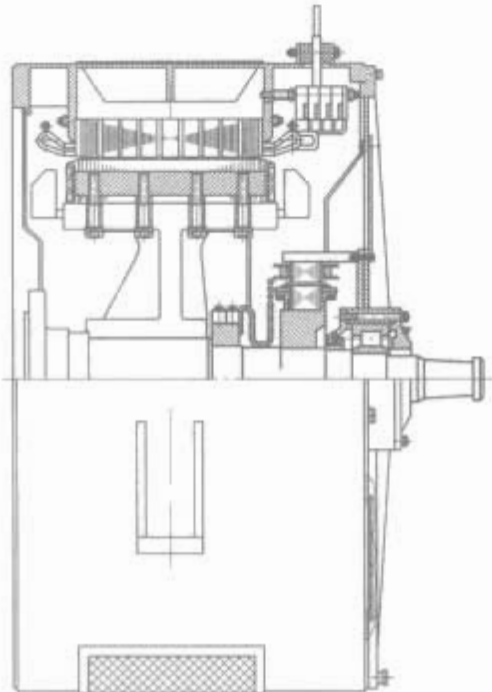


图 2.3-124 JF220 牵引同步发电机主要零部件

4.5.1 定子

定子部分由机座、定子铁心、电枢绕组等组成。由于径向自通风或轴向外通风冷却方式的不同，其定子部分的结构有所不同。

4.5.1.1 定子铁心

定子铁心中安放电枢绕组并且作为定子磁路部分。由于牵引同步发电机采用较高的磁负荷和较高的频率，为提高导磁性能，减少铁心损耗，采用低损耗的冷轧硅钢片 50W350。因为定子铁心外径已超过硅钢片的宽度尺寸，无法采用整圆冲片，定子铁心用扇形冲片拼圆叠成。扇形冲片的设计最好应使每片扇形冲片上的槽数为偶数，尽量避免奇数槽。拼片数应符合以下原则

$S/t = \text{偶数}$

式中：S 为定子铁心圆周上的拼缝数；t 为圆周上的拼缝数与极对数的最大公约数。

扇形冲片示意见图 2.3-125。

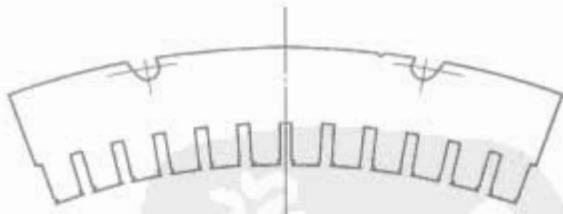


图 2.3-125 扇形冲片示意

采用径向自通风冷却方式的定子铁心有径向通风道，为通风良好，整个铁心长度上每隔约 40~50mm 设置一道径向通风道，径向通风道的宽度为 10mm。径向自通风冷却方式的定子铁心示意见图 2.3-126。

采用轴向外通风冷却方式的定子铁心则不设径向通风道，电机轴向长度可稍短。轴向外通风冷却方式的定子铁心示意见图 2.3-127。

4.5.1.2 机座

采用径向自通风冷却方式的机座，外圆罩板用 8mm 厚的钢板卷成圆筒与前后端板、幅板、筋条等焊接而成。外圆罩板上开有出风窗口，罩板与筋条间形成通风风道。机座焊

后经时效处理。定子铁心外圆与沿圆周分布的筋条配合，用紧固螺杆固定在机座内的幅板上。

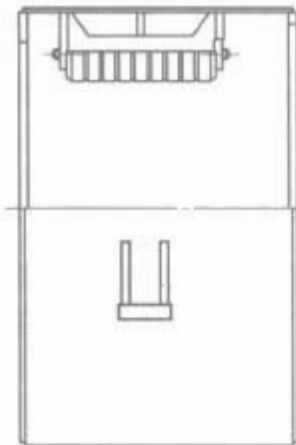


图 2.3-126 径向自通风冷却方式的定子铁心示意

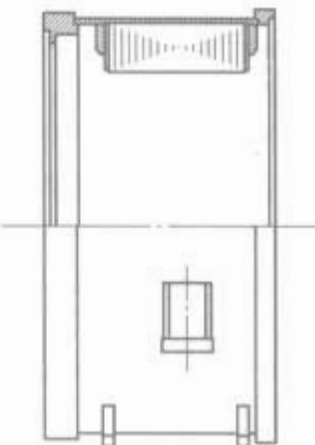


图 2.3-127 轴向外通风冷却方式的定子铁心示意

采用轴向外通风冷却方式的机座，用厚钢板卷成圆筒与两端法兰盘焊接而成。机座上设有通风窗口。定子铁心外圆与加工后的机座圆筒的内圆配合，JF204D 机座外圆焊有沿外圆周分布的加强筋，定子铁心用螺杆紧固在机座内；JF202 则是用热套的方式将定子铁心固定在机座内。

4.5.1.3 定子线圈

三相电枢绕组嵌放在定子铁心内圆的铁心槽中，切割磁场感应三相电动势。电枢绕组采用分布和短距的双层叠绕组，带中性点的 Y 形接法。绕组两端分别扎紧在端箍上固定，以防止绕组端部受到电磁力冲击作用而变形。

绕组元件即定子线圈是用单玻璃丝包聚酰亚胺薄膜绕包铜扁线多根并绕的成型线圈，直线部分和端部分别绝缘，嵌入定子铁心后定子整体进行真空压力浸漆处理。

4.5.2 转子

转子随励磁方式的不同而有不同的结构：采用感应子励磁机外励磁的转子上有将直流励磁电流引入励磁绕组的集电环；采用同轴式无刷交流励磁机励磁的转子上装有交流励磁机的电枢和旋转整流器。

4.5.2.1 磁极

磁极由磁极铁心和套在磁极铁心上的励磁绕组组成。磁极铁心由冲制的冷轧钢板叠压而成，中间穿有 45 号锻钢的拉杆，作为固定磁极紧固螺钉用。磁极用材质为 35CrMo 的锻钢，螺钉紧固在磁轭支架上。由于转速较高，磁极承受较高的机械应力，应对磁极螺钉的受力进行计算。

励磁绕组用铜扁线扁绕成形，匝间垫坯布热压胶化进行绝缘处理。励磁绕组对地绝缘是在磁极极身上烫包绝缘，励磁绕组套入磁极铁心，间隙用适形材料塞紧，转子进行整体真空压力浸漆，成为磁极一体化结构，保证了磁极绕组的机械强度和足够的绝缘强度。

4.5.2.2 支架与转轴

为减小转子的质量，辐板式磁轭支架热套在转轴上，材料为铸钢 ZG230-450 或焊接而成。转轴用 45 号锻钢加工制成。大端法兰与柴油机曲轴用弹性联轴节连接，另一端锥度轴伸安装辅助传动齿轮，用于传动辅助装置。

4.5.2.3 集电环与受流系统

感应子励磁机励磁的牵引主发电机集电环安装在靠近单轴承端，2 个带有螺旋槽的集电环固定在集电环座上，正负集电环用螺栓与励磁绕组的引出线相连。集电环材料为铸硅黄铜 ZCuZn16Si8。

4.5.2.4 无刷励磁与旋转整流器

(1) 交流励磁机。随着无刷励磁技术的日益成熟和发

展，同步牵引发电机采用交流无刷励磁方式是今后的发展趋势。交流励磁机是旋转电枢式交流同步发电机，电枢和旋转整流器安装在靠近单轴承端主发电机的轴上，定子部分固定在发电机的端盖上。

由于交流励磁机的工作特点和负载的特殊性，与一般的同步发电机要求大不一样，设计上有许多特点。

1) 交流励磁机的磁路设计。交流励磁机的输出电压 U_L 随主发电机负载及工作温度的变化会有很大幅度的变化，相应交流励磁机的感应电动势也是大幅度地变化，这是交流励磁机的负载特点。相应于交流励磁机额定工作状态的磁路工作点处于空载特性的直线部分，即交流励磁机的额定工作状态时的磁密要取得很低，磁负荷 B_0 通常取 0.5T 左右。因此，铁磁材料的利用率很低，体积和质量较一般的同步发电机大。

2) 特殊的电压变比和电流变比。由于交流励磁机的电枢具有电感，换相时电流不能突变，产生换相角。电压变比和电流变比是换相角 γ 的函数，电压变比 K_u 和电流变比 K_i 分别为

$$K_u = \frac{U_d}{E_L} = 2.34 \times \frac{1 + \cos \gamma}{2} \tag{2.3-199}$$

$$K_i = \frac{I_L}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \sqrt{1 - 3 \times \frac{\sin \gamma (2 + \cos \gamma) - \gamma (1 + 2 \cos \gamma)}{2\pi (1 - \cos \gamma)^2}} \tag{2.3-200}$$

式中： U_d 为整流桥输出直流电压，V； I_d 为整流桥输出直流电流，A； E_L 为交流励磁机电枢相电动势，V； I_L 为交流励磁机电枢相电流，A。

3) 交流励磁机的电枢反应。由于交流励磁机的负载主发电机的励磁绕组是一个大电感，能使直流输出电流 I_d 保持恒定，并且由于换相角的存在，交流励磁机相电流波形与正弦波相差很大。计算电枢反应时，应首先计算出基波电流，再计算出电枢反应磁动势。

4) 为改善主发电机的动态特性，交流励磁机设计时应注意尽量选用较小的短路比，缩短励磁机的时间常数。较小的短路比也能使交流励磁机设计得经济些，缩小体积，减小质量。选用较高的频率，目的也是使励磁机有较小的时间常数，措施是增加交流励磁机的极对数。

(2) 旋转整流器。旋转整流器是无刷同步发电机的重要组成部分，在一定程度上决定了发电机的可靠性。因此，旋转整流器的正确设计，旋转整流元件的合理选用是一项关键工作。

1) 整流线路的选择。三相全波整流效率高，动态特性好，大容量的同步发电机以选择三相全波整流线路较好。

2) 旋转整流元件的选用。旋转整流元件必须是能够耐受强大离心力、耐受机械振动的旋转元件，必须有极高的可靠性，在承受机械应力的情况下能保持良好的电气性能。

旋转整流元件采用旋转整流二极管，也有选用旋转整流模块的。如果一般二极管电流容量取安全系数为 3 倍，则旋转整流二极管的额定工作电流为

$$I_F = K_I \frac{i_{IN}}{3} \approx i_{IN} \tag{2.3-201}$$

式中： K_I 为安全系数， $K_I = 3$ ； i_{IN} 为牵引同步发电机的额定励磁电流，A。

在三相全波整流情况下，旋转整流二极管的最高反向工作电压等于 3~4 倍的牵引同步发电机的额定励磁电压，即

$$U_{RM} = (3 \sim 4) U_{IN} \tag{2.3-202}$$

4.5.3 总装

4.5.3.1 端盖

端盖为焊接结构，由轴承套、加强筋、法兰盘、侧板等焊接而成。径向自通风结构的端盖上开有通风窗口，覆以网罩，内侧装有挡风板，结构见图 2.3-128。

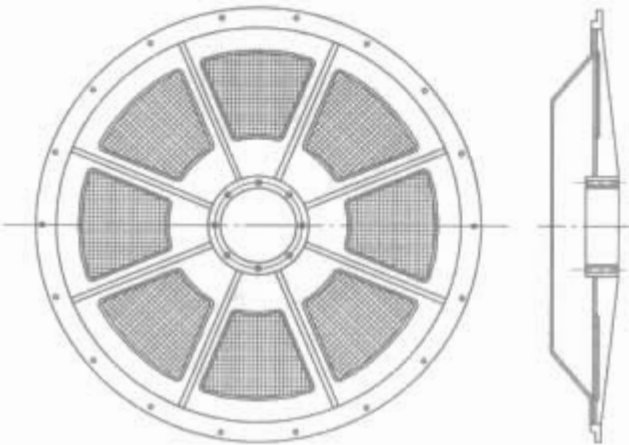


图 2.3-128 径向自通风端盖示意图

轴向外通风的端盖在端盖上有进风口，由通风机将冷却空气送入发电机进行冷却。

4.5.3.2 轴承

目前同步牵引发电机轴承多采用单列圆柱滚子轴承，型号为 E32626QTY。轴承安装在端盖的轴承套中，采用曲路环或迷宫密封。轴承装配时加热温度不高于 120℃。

4.5.3.3 刷架系统

刷架系统由刷杆和弧形板固定在端盖内侧，励磁接线盒固定在端盖外侧。刷握分成 2 组通过螺钉固定在弧形板上。励磁引线一端与弧形板相连，另一端由端盖上的励磁引线孔引出，接入励磁接线盒。

4.6 试验

4.6.1 试验方法与试验标准

试验方法与试验标准按照 TB/T 2436—2006，并参照 GB/T 1029—2005《三相同步电机试验方法》和 GB/T 2423.4—1993《电工电子产品基本环境试验规程 试验 Db：交变湿热试验方法》。

4.6.2 试验内容

4.6.2.1 例行试验

例行试验是为了确定每台新装配的电机在电或机械方面是否符合其据以制造的标准要求而进行的试验。例行试验的项目有：

(1) 绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定。测量绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻时应根据被测绕组的额定电压按表 2.3-43 选择绝缘电阻表。

表 2.3-43 绕组对机壳及绕组间绝缘电阻的测定选择绝缘电阻表规格

被测绕组额定电压	绝缘电阻表规格
<500	500
500~3300	1000
>3300	2500

电机绕组的绝缘电阻在热状态时或温升试验后，应不低于式 (2.3-203) 所求得的数值，即

$$R = \frac{U}{1000 + \frac{P}{100}} \tag{2.3-203}$$

式中： R 为电机绕组的绝缘电阻，MΩ； U 为电机绕组的额

定电压, V; P 为电机的额定功率, kW。

(2) 绕组在实际冷状态下直流电阻的测定。绕组的直流电阻可用电桥法、微欧计法或其他测量方法测量, 测量时电机绕组、铁心与周围环境温度之差应不超过 2K。

(3) 空载特性的测定。电机应在额定转速下测定空载特性。试验时, 被试电机拖动到额定转速, 电枢绕组开路, 励磁装置系统应断开, 在他励方式进行。调节励磁电流使空载电枢电压达到额定值的 1.3 倍作为空载特性的起始点, 然后单方向逐步减小励磁电流到零, 最后读取励磁电流为零时的剩磁电压。若空载特性试验中剩磁电压较高, 则应对空载特性曲线进行修正。

(4) 稳态短路特性的测定。电机应在额定转速下测定稳态短路特性。测定三相稳态短路特性时应用低阻抗导体在尽可能接近电枢绕组出线端处将线端可靠地短接。试验时, 励磁装置系统应断开, 电机应在他励方式下运行。

(5) 小时定额温升试验。试验持续时间为 1h。试验应从电机实际冷状态开始。

(6) 满功率及恒功率调整曲线的测定。以型式试验确定的典型曲线为依据, 并在最后确定的励磁值下, 对满功率曲线上最大电流点、低电压连续定额点、高电压连续定额点进行检查, 与典型特性曲线上相应值之差均不应大于±5%。

(7) 超速试验。电机在热状态下以 1.25 倍额定转速值进行 2min 的超速试验。试验后, 电机应不发生有害变形且能承受介质强度试验。

(8) 短时升高电压试验。电机应能承受升高电压试验而绕组匝间绝缘不发生故障或击穿。试验在电机空载时进行。试验的感应电压为额定电压的 1.3 倍, 试验时间为 5min。当将试验电压提高到额定值的 1.3 倍时, 允许同时提高频率或转速, 但不应超过额定转速的 1.15 倍或超速试验中所规定的转速。

(9) 介质强度试验。介质强度试验只对新装配完成、各部件处于正常状态下的电机进行。试验前应先测定绕组的绝缘电阻, 如电机需进行超速、短时过电流或温升等试验, 介质强度试验在这些试验之后进行。试验应在电机静止及热状态下进行。试验时施加电压应从不超过试验电压全值的 1/3 开始, 以后逐渐增至全电压值。全值电压试验时间应维持 1min。试验电压应为交流并尽可能接近正弦形, 频率约为 50Hz, 试验电压按表 2.3-44 规定。

表 2.3-44 绝缘试验电压		
组别	绕 组	试 验 电 压
1	不与接触网相连的绕组 (不包括第 2 组)	交流试验: $2U_2+1000V$, 最小值为 1500V 直流试验: $3.4U_2+1700V$, 最小值为 2550V
2	交流发电机的磁场绕组	交流试验: $10U_3$, 最小值为 1500V 最大值为 3500V 直流试验: $17U_3$, 最小值为 2550V 最大值为 5950V

注 1. U_2 为正常运行中能加到绕组上的最高对地电压。 U_3 为最高励磁电压。
2. 对于交流电压, 试验电压和 U_2 、 U_3 都是有效值。

4.6.2.2 型式试验

型式试验是为了确定电机是否符合其所据以制造的标准的要求, 对电机的特性和参数进行全面考查而作的试验。每次型式试验的电机不得少于 2 台。型式试验的项目包括:

- (1) 例行试验的全部项目。
- (2) 外通风时电机进风口处的空气静压头与冷却空气流

量关系曲线的测定。

(3) 连续定额温升试验。根据试验设备条件, 可采用直接负载法、低功率因数负载法和空载短路法。

空载短路法作温升试验时, 被测电机作发电机运行并进行以下 4 次温升试验:

- 1) 电机空转, 不加励磁, 测得温升为 $\Delta\theta_0$ 。
- 2) 电机空载, 电枢电压等于 105% 额定值, 测得温升为 $\Delta\theta_{U1}$ 。
- 3) 电机空载, 电枢电压等于 120% 额定值, 测得温升为 $\Delta\theta_{U2}$ 。
- 4) 电机三相对称短路, 电枢电流等于额定值, 测得温升为 $\Delta\theta_K$ 。

电枢绕组温升按式 (2.3-204) 确定, 即

$$\Delta\theta_{aN}=\Delta\theta_K\left(1+\frac{\Delta\theta_{U1}-\Delta\theta_0}{K+\theta_c+\Delta\theta_K}\right)+\Delta\theta_{U1}-\Delta\theta_0$$

(2.3-204)

式中: θ_c 为三相对称短路温升试验时冷却介质的温度, °C; K 为常数, 铜绕组取 235。

额定工作方式下定子铁心温升按式 (2.3-205) 确定, 即

$$\Delta\theta_{FeN}=\Delta\theta_K+\Delta\theta_{U1}-\Delta\theta_0$$

(2.3-205)

(4) 效率的测定。效率的测定有直接法和间接法 2 种。效率的直接测定法是测量被试电机的输出功率和输入功率以确定电机效率。间接测量法是测量和分析被试电机的总损耗以确定电机效率。总损耗为电机本身的损耗以及与电机成为一体并供电机专用的辅助设备的损耗之和。设计、试验时, 电机的总损耗仅计入电机本身的损耗。

(5) 短时过电流试验。电机在热状态下应能承受 1.5 倍额定电流、历时 15s 不发生有害变形。此时电压尽可能接近额定值。发电机有高电压和低电压 2 个连续定额时, 电流为低压连续定额电流。

(6) 电压调整率的测定。

(7) 额定励磁电流的测定。可采用直接负载法将电机直接加负载到额定状态, 测得额定电枢电流、额定功率因数和额定电压时的励磁电流。电机不能加负载到额定状态时, 可用保梯电抗法近似地求得额定励磁电流。

(8) 电压波形正弦性畸变率的测定。电机线电压波形应在额定电压和额定转速的空载情况下测定。可以用波形畸变测定仪直接测定, 也可以用谐波分析测定出基波电压和各次谐波电压的数值, 然后用式 (2.3-206) 计算出畸变率 K_u , 即

$$K_u=\frac{\sqrt{U_2^2+U_3^2+U_4^2+\cdots+U_n^2}}{U_1}\times 100\%$$

(2.3-206)

式中: K_u 为波形正弦性畸变率; U_1 为基波电压有效值, 可用线电压有效值代替; U_n 为 n 次谐波电压有效值。

也可用微机将电压波形的瞬时值记录下来, 再分解出基波电压和各次谐波电压的数值, 并计算出畸变率 K_u 。

线电压波形正弦性畸变率按表 2.3-45 规定。

表 2.3-45 线电压波形正弦性畸变率		
额定功率 (kVA)	线电压波形正弦性畸变率允差 (%)	
	不带整流器工作的电机	带整流器工作的电机
10 以下	由用户与制造厂双方商定	
10~300	10	15
300 以上	5	10

(9) 湿热试验。电机按高温 40℃ 交变湿热试验 6 周期后应达到下列要求：

1) 电机绕组对机壳和绕组间的绝缘电阻应不低于由式 (2.3-204) 确定的数值，最小不得低于 0.22MΩ。

2) 电机绕组对机壳和绕组间的介质强度，按表 2.3-44 规定值的 85% 进行 1min 的试验，应无击穿现象。

3) 电机绕组应能承受短时升高电压试验。

4) 试验后电机的转动部分无异常现象。

(10) 耐振强度试验应满足下列要求：

1) 试验应在专门的振动试验台上进行，允许在机车、动车上检查耐振强度。

2) 耐振强度试验应在 5~100Hz 范围内的某一固定频率下进行。振动加速度值对于安装在转向架簧上部分和车厢内的牵引电机采用 3g。试验持续时间对于主发电机为 2×10^7 次。

3) 试验时电机在额定转速和保证绕组具有额定温升的工况下运行。

4) 耐振强度试验允许中断，但应保证总的试验持续时间。

5) 若电机因质量过大或体积过大，不能在已有的试验台进行试验时，允许仅试验其中的重要部件。

若试验后没有妨碍完成既定功能的机械性损伤，则认为电机通过了试验。

(11) 质量测定仅在电机试制或必要时进行。

4.7 维护保养

同步牵引发电机运行中负荷变化频繁，转子离心力大，运行环境中的振动、潮湿、尘土及油雾等造成电机容易发生故障。有些故障是由于制造过程质量控制和工艺质量等存在问题，如电枢绕组和磁极绕组匝间短路、对地击穿、磁极紧固螺钉松动和断裂、轴承烧损等，有些是运行过程中或检修后产生故障，须对故障现象认真分析，采取相应对策。

4.7.1 故障分析与对策

同步牵引发电机常见故障的分析与对策见表 2.3-46。

表 2.3-46 同步牵引发电机常见故障的分析

故障现象	故障原因分析
发电机不能建立电压	励磁系统故障 励磁绕组断路，一般是极间连线或引出线处焊接不牢 励磁线路正负两端短路或同时接地 励磁绕组部分匝间短路或极性接错 电枢绕组断路
发电机电压太低	励磁机发出的电压低 励磁线圈接错 部分励磁线圈匝间短路 电机过载
绕组和铁心过热	电机通风不良，电机不清洁 周围环境温度过高
轴承过热	润滑脂牌号不对，油脂不足或过多 润滑脂不清洁，有杂质或变质现象 轴承游隙不符合要求，装配尺寸不正确 轴承磨损超限或轴承损坏
绝缘击穿	发电机发生异常情况，短时电压突然升高 绝缘电阻过低，绝缘受到酸、碱等腐蚀性气体侵害，线圈不清洁，过于潮湿 绝缘老化
发电机振动	安装不良，发电机组的中心不在同一轴线上；转子倾斜或联轴器安装不正确 发电机转轴弯曲 发电机转子或柴油机曲轴平衡不良 发电机励磁绕组匝间短路造成磁路不平衡 柴油机本身故障

4.7.2 关键部件的维护保养

(1) 定子维护。定子内及定子线圈应定期经常地进行清理，防止积尘过多，造成发电机温升过高，缩短发电机的使用寿命。每次检修时，都要测量绝缘电阻是否符合要求，绝缘状态的良好与否反映了发电机安全状态的好坏，必须高度重视。

(2) 转子维护。同步牵引发电机的转子是一个以较高的转速旋转的部件，除了应经常清理转子上的积尘外，如果转子有阻尼绕组，应检查阻尼环与阻尼杆间有无断裂、脱焊、烧毁等现象。若有上述现象，应立即进行检修。每次检修时也应测量绝缘电阻，检查风扇等旋转部件有无裂纹现象，连接固定处有无松动现象。无刷励磁的发电机要检查旋转整流器有无损坏及松动现象。

(3) 集电环、电刷和刷架系统维护。应重视集电环、电刷和刷架系统的维护。当集电环和电刷上有油污、集电环表面粗糙度差、集电环与电刷接触面太小、集电环跳动量过大、电刷在刷盒内卡住、电刷压力不够时电刷上会产生火花，烧坏电刷和集电环。当集电环和刷架系统附着电刷的碳粉或集电环间的绝缘损坏，将会在集电环间产生电弧。因此，在运行中应及时清理集电环和电刷上的污垢，使电刷与集电环接触良好。电刷与集电环磨损后，及时调整好电刷压力和刷盒底部距集电环表面的距离。更换电刷时应控制电刷与刷盒的间隙，电刷能在刷盒内上下自由滑动，磨电刷以保证电刷与集电环的接触面积不小于 40%。

(4) 轴承的维护。同步牵引发电机为单轴承结构，采用的滚动轴承是一种高精度的承受高负荷的零件。常因轴承选择不当，轴承内外圈与转轴轴径和端盖孔的配合不当，润滑和安装不良，维修保养错误造成烧结、断裂、裂纹等轴承故障。因此，轴承的安装、润滑和维护保养非常重要。运行过程中应每隔半年补充润滑脂一次，加入的润滑脂应清洁且为同一牌号。使用满 2 年，轴承须用适当溶剂清洗，重新润滑。轴承的清洗可用汽油、乙醇或中性的清洗剂。润滑脂的填充量首先应填满轴承内部，轴承室内添加至容积的 1/2~2/3。同时必须非常注意润滑脂的清洁。

5 控制与网络

5.1 列车通信网络的基本任务和构成

动车组的兴起使控制技术从传统的单台机车控制向列车网络控制方向发展。列车控制网络是由列车总线和车辆总线将分布在各个车辆中的计算机控制部件互相连接的网络，以实现全列车的重联控制、数据通信、显示和诊断功能。列车控制网络的基本任务是：

(1) 实现各动力车或动车的重联控制，即由一个司机室来操纵全列车的动力车或动车。司机的操作命令需通过列车通信网络传送到各个动力车或动车，同时将各动力车或动车对命令的执行情况、各部件状态及时反馈给司机。如果某些命令未能执行，则应按故障导向安全的原则采取相应措施。

(2) 实现全列车分布在各个车辆中计算机控制部件的联网通信和资源共享。

(3) 实现全列车的制动控制、门控制、轴温监测和空调等控制。

(4) 完成全列车的自检、故障监测诊断和故障评估决策。

为此需要有一个硬件可靠、软件资源丰富，并经实践检验的列车控制网络。

列车控制网络由列车总线和车辆总线组成。列车总线连接各个车辆中的节点（中央计算机）。一般一个单元或一个车辆中只设一个节点。为了可靠冗余，在首尾动力车中可以设 2 个节点。首尾有司机室的单元或车辆中的节点为主节点，其他为从节点。车辆总线以本车中的节点为主站，连接本车中的各计算机部件，节点起着“网关”的作用，承担这两层网络间的协议转换。图 2.3-129 所示为列车总线和车辆总线示例。此外，各功能部件还可通过控制器总线与相关部件进行通信，有的节点本身亦具备与其他设备通过控制器总线进行通信的能力。图 2.3-130 所示是出口伊朗电动车组的 TM1 型动力车的微机控制网络，专用检测工具只在需要时才连上，总线上用虚线表示。

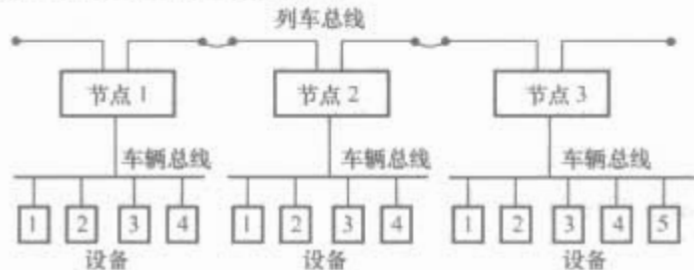


图 2.3-129 列车总线和车辆总线示例

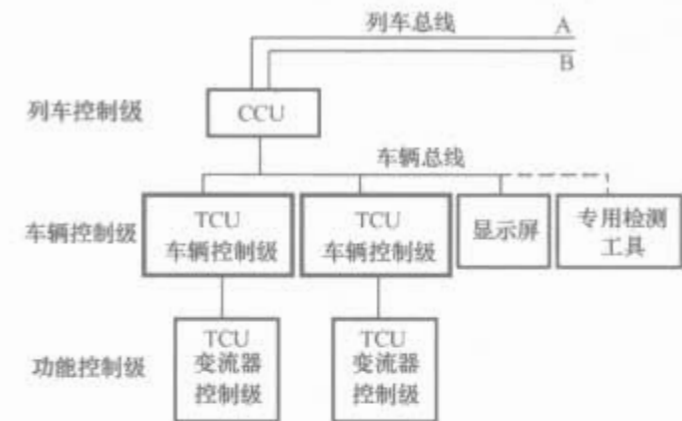


图 2.3-130 TM1 型动力车的微机控制网络

5.2 国内外列车通信网络标准

各个国家研制的列车通信网络各有其特点和适用范围，为了使不同国家制造的车辆能混编成同一列车，要求制定统一的国际标准。目前已经形成了 2 种国际标准：

(1) IEC 61375—1:1999《列车通信网络》(简称 TCN)。它流行于欧洲电力机车上，以庞巴迪、德国的 SIEMENS、意大利的 ANSALDO 公司为代表，适用于实时性要求高时限紧迫的通信。

(2) 电气与电子工程师协会的 IEEE 1473:1999《列车通信协议》。它分成 T 型和 L 型两部分。T 型等同于 TCN；L 型为 Lonworks。后者用于时间不太紧迫但要求价格低廉的场合下通信，如用于车辆总线和传感器总线，数据传输率（每秒钟可以传输信息位的数量，单位为 bit/s）为 78 kbit/s。它流行于美国、加拿大等国家的内燃机车上。

TCN 规定了绞线式列车总线（WTB）和多功能车辆总线（MVB）。WTB 以德国 DIN V 43322 和意大利 CD450 高速列车的经验为基础，MVB 则以瑞士 Loco460 型机车上创造的总线为基础。已交付或投入运行的采用 TCN 的车辆达 1000 辆以上，它保证 MVB 上的所有重要变量，从一个应用到另一个应用的确定性传送时间小于 16ms，而通过 WTB 从车辆总线到车辆总线的确定性传送时间小于 100ms。

WTB 采用双绞屏蔽线介质，数据传输率为 1Mbit/s，无需中继器便可覆盖 860m，相当于 22 节车辆的编组，最多可支持 32 个节点。WTB 适合于经常摘挂组成可变的非固定

编组列车。每当列车组成发生改变或上电时，通过“初运行”，由当前的主节点给各车辆上的节点顺序自动编号，并识别列车的左侧和右侧，实现网络自动重构而无需人工干预。另外，WTB 有加电清除功能，以防连接器触点氧化带来的不良后果。

MVB 用于连接本车内的设备，也可用于固定编组列车中连接不同车辆上的设备。MVB 可通过 3 种介质工作至 1.5Mbit/s：①短距离（ESD）用的 RS485，无隔离的双绞屏蔽线，传输距离小于或等于 20m。②中距离（EMD）用的变压器隔离的双绞屏蔽线，传输距离可达 200m。ESD 介质经光电隔离（ESD+）后传送距离亦可达到 200m。③长距离用的光纤（OGF），传送距离可达 2000m。

尽管在物理层和链路层 WTB 与 MVB 有所不同，但它们都遵守同一实时协议，总线上主要传输 2 类数据：

1) 过程变量。它反映列车状态，如速度、电流、操作命令等，过程变量的传送时间必须短而确定，因而采用周期性传送。

2) 消息数据。指不频繁传送，但可能冗长的信息，如故障诊断信息，它根据需要采用偶发性传送。

列车总线除 WTB 外，还流行 FSK（移频键控），以庞巴迪为代表，它不采用曼彻斯特编码（如 WTB、MVB），而采用移频方式：149.1kHz 代表“0”；179.0kHz 代表“1”，数据传输率为 19.2kbit/s。它遵守 TCN 标准的实时协议，具有给节点自动连续编号和识别列车左、右侧的功能。

国内也已制定了相应的 TB/T 3035—2002《列车通信网络》。该标准规定了 2 种网络：IEC 61375—1:1999 规定的列车通信网络（T 型）和 EIA709.1 及 EIA709.3 规定的 Lonworks（L 型）。标准推荐使用 T 型网络，特别是用于非固定编组的列车，实时性要求高，传送时间要求确定，时限紧迫的场合以及有列车互操作性要求的场合。该标准同时保留了 L 型网络一定的使用空间：对于节点数较少、传送数据量不大、时限不太紧迫的固定编组列车可以采用 L 型网络；但其性能和互操作性应由设计者验证和保证。该标准还规定一列车中宜采用一种网络，或是 T 型，或是 L 型，在同一列车中不考虑 T 型和 L 型间的协议转换，使网络结构简单，提高通信的可靠性。

T 型网络摘要见表 2.3-47。L 型网络的参数见表 2.3-48。

表 2.3-47 T 型网络摘要		
特 性	绞线式列车总线(WTB)	多功能车辆总线(MVB)
构 形	可变的结构，当组成改变时自己组态	固定结构和设备地址
介 质	双绞屏蔽线，特征阻抗 120Ω(860m，32 个节点，相当于 22 节车辆)	基于 RS485 双绞线(20m，32 个设备)；变压器耦合的双绞屏蔽线(200m，32 个设备)；带星耦合器的光纤(2000m，2 个设备)
物理冗余	双份物理介质	双份物理介质
信号编码	有 16~32 位帧头的曼彻斯特码	有分界符的曼彻斯特码
数据传输率(Mbit/s)	1.0	1.5
响应时间(ms)	≤100	≤16
地址长度	过程数据(每节点 1 帧)和消息数据都为 8 位地址	过程数据(逻辑地址)和消息数据(物理地址)都为 12 位地址

续表		
特 性	绞线式列车总线(WTB)	多功能车辆总线(MVB)
物理地址	点对点 and 广播	点对点 and 广播
有效的帧长度	可变的 4~132 个 8 位位组	固定为 16, 32, 64, 128 或 256 位
完整性	每帧 FCS-16、帧长度检查及曼彻斯特编码, 汉明距 4	IEC60870 校验序列及帧长度检查, 汉明距 4 (光纤介质为 8)
介质分配	由一个总线主	由一个总线主
主权转移	每个节点都可成为总线主、强总线主(根据命令)或弱总线主(根据默认)	通过令牌传递总线管理器成为总线主
总线主冗余	初运行后, 总线主权转移到另一节点	自动的主权转移, 由令牌传递进行冗余校验
链路层服务	过程数据(周期性) 消息数据(偶发性) 监视数据(偶发性/周期性)	源寻址广播数据集 点对点或广播数据报文 总线监视的数据

表 2.3-48 L 型网络的参数

参 数	指 标
介质	16AWG(美国线规)双绞屏蔽线
拓扑	总线型(能支持环形、自由拓扑)
通信距离(m)	≤2700
信号编码	差分曼彻斯特码
数据传输率(kbit/s)	78
完整性	汉明距 4
节点(设备)数	最多 255×127
介质访问	可预测 P—坚持 CSMA/CD(载波监听多路访问/冲突检测)
链路层服务	事件驱动型偶发性传送、广播或垂询

为了实现互操作性, UIC556 对列车总线上的过程数据报文以及消息数据报文作了规定。对过程数据报文的一些字节和位的含义作了定义, 对消息数据格式作了规定。

UIC 556 中规定了 3 种过程数据报文: R1 为由操作车发往其他车辆的命令及与牵引有关的信息报文; R2 为由被牵引车辆返回的牵引状态信息报文; R3 为与客车有关的信息报文。第 1、2 字节为报头, R3 固定为第 3 字节至第 40 字节, R1 和 R2 固定为第 41 字节至 128 字节。其中一部分字节 UIC 已经定义, 仍有一部分空间预留, 具体结构见表 2.3-49。

表 2.3-49 UIC 556 的过程数据报文结构

报文名	内 容	字节范围	字节数
R3 报文	报 头	1~2	2
	国际已定义	3~30	28
	国际预留	31~38	8
	国内预留	39、40	2
R1/R2 报文	国际已定义	41~63/64	23、24
	国际预留	64/65~84	21、20
	国内预留	85~128	44

国内对列车总线上的数据传送的标准为 TB/T 3116—2005《列车总线上的信息传送》, 它是在 UIC 556; 1999《列车总线上的信息传递》的基础上, 保留原来已定义字节和位, 根据国内情况又作了一些新的定义。R3 报文中的 31~38 字节已经有了定义, 用于控制各车辆中的逆变器、空调, 并返回各逆变器、空调、门、轴温等状态, 司机可以控制某一辆车中的设备, 也可以集控所有车辆。在 R1 和 R2 报文中, 第 121~128 字节已作了定义, 用于传送制动缸压力和空重车压力以及由司机遥控本动车组中各个主变流器、压缩机、辅助压缩机及主断路器, 以适应动力分散型动车组控制的需要。

关于消息数据报文前 9 个字节的定义与 UIC 556 相同, 只是第 1 字节铁路代码固定为 43H, 它是 CHINA 中国第一字母“C”的 ASCII 码。功能地址和应用识别号的定义都与 UIC 556 相同, 从第 10 字节起由用户自行定义。

在列车通信网络标准方面, WTB 可实现非固定编组列车的通信网络自动重构而无需人工干预, 该功能是目前其他通信标准所不具备的, 它得到世界各国的认可。在车辆总线方面, 目前还只把 MVB 列入标准, 但是国际上一些大公司都想把自己的标准纳入车辆总线标准。2004 年 11 月在上海召开的 IEC TC9 年会上已同意将 FIP、TIMN (日本)、Profinet、Ethernet、Lon、Can 作为车辆总线之一, 正在着手起草相关标准, 但对于 Lon、Can 总线的性能和互操作性应由设计者验证和保证。

5.3 列车通信网络

近几年, 国内已出厂的动车组主要有以下几种:

(1) 出口伊朗的电动车组。2 动 8 拖, 首尾为动力车 TM1 型。为解决动力车重联, 从庞巴迪引进 MICAS-S2 系统。控制网络由 3 级构成 (见图 2.3-130)。列车总线采用 FSK, 数据传输率为 19.2kbit/s, 介质为双绞屏蔽线。车辆总线采用 MVB, 数据传输率为 1.5Mbit/s, 介质为光纤。该动车组 1997 年出厂, 2004 年又得到第 2 批订单。

(2) 交—直传动电动车组。该动车组为 1 动 (DDJ1 型动力车) 6 拖直流传动动车组, 也采用 MICAS-S2 系统。全列车上也只有 2 个节点 (动力车和控制车上各一个), 能由控制车操纵全列车, 可在 2 个方向上行驶。但总线结构与 TM1 型动力车有 2 点不同: 一是车辆之间连接的跨接电缆由一个车的末端伸出, 至另一节车辆的插座, 从而省去一组接插件; 二是考虑到能将两列短编组列车连接成长编组工作, 列车总线冗余方式作了改变。在 TM1 型动力车中, 将前向通道折回作为列车总线冗余通道, 只是同一块接插件通道和列车总线介质的冗余; 而 DDJ1 型动力车上增加了一套列车总线硬件, 做到列车总线硬件和通信介质的双冗余 (见图 2.3-131)。该动车组 1999 年出厂, 最高速度为 200km/h。

(3) “春城”号电动车组。该动车组为 3 动 3 拖编组直传动动的动车组, 采用 RS 485 通信标准, 显示屏作为主机, 分时与各动车通信。控制命令不经网络传送, 通信只传送状态数据, 供显示屏显示。它的基础是 SS_{4B} 型机车。但 SS_{4B} 型机车的通信, 是在两节相邻的机车间; 而在“春城”号电动车组上, 距离加长了, 因而须采取许多有效的抗干扰措施。该动车组 1999 年投入运行。

(4) “新曙光”号内燃动车组。该动车组为 2 动 9 拖编组, 采用 Lonworks 实现了点对点的通信 (设在首尾机车上), 从而实现了双机重联控制。该动车组 1999 年投入运行。

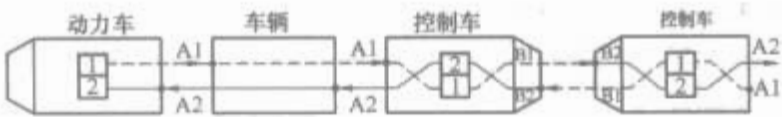


图 2.3-131 200km/h 交一直传动电动车组编组形式及列车总线连接关系

(5) “先锋”号交流传动电动车组。该动车组为 4 动 2 拖编组，采用 MICAS-S2 系统，列车总线为 FSK，车辆总线为 MVB。一列车有 6 个节点，列车总线上通信周期为 $6 \times 70 = 420\text{ms}$ ，一个节点传送的有效字节数应小于或等于 40 个。列车总线的传送速度在 6 个节点时可以满足要求，而 MVB 数据传输率很高，可以挂多个设备或向一个设备传送大量信息，如主节点将 200 多字节数送到显示屏。该动车组运行速度为 200km/h。

(6) “中原之星”动车组。中原之星开始为 4 动 2 拖，后扩编成 8 动 6 拖的 4 单元结构。列车总线采用 FSK，车辆总线采用 MVB，每个单元设置一个节点，车辆总线贯穿一个单元，利用车辆总线的高数据传输率将一个车辆单元中的各个计算机控制设备联网，同时一个单元内部消费的数据就可不通过列车总线发送。由于一个单元只设一个节点，总节点数比较少，因而提高了列车总线上数据传送的实时性。该动车组最高速度为 160km/h。

(7) “蓝箭”交流电动车组。该动车组为 1 动 6 拖编组。开始时只在动力车和控制车上各设一个节点，后来在 6 个拖车上各增加一个节点，亦即控制车上有 2 个节点，一个节点（主节点）用于动力车操纵，另一个节点用于拖车。这样全列车上共有 8 个节点。列车总线为 WTB，车辆总线为 MVB。WTB 的基本周期为 25ms，在一个周期中最多只能与 7 个节点通信，因而将主节点的通信周期设置为 25ms，以保证与动力有关信息的快速性，将拖车的节点设置为 50ms。这样在一个基本周期中访问 5 个节点。该动车组最高速度为 200km/h。

(8) “中华之星”交流动车组。该动车组为 2 动 9 拖编组，列车总线采用 WTB，全列车共有 11 个节点，车辆总线采用 MVB。动力车和拖车中都有 3 级网络，它与 TCN 标准一致，是国内最完善、最先进的列车控制网络。该动车组运行速度为 270km/h。

(9) 国产地铁动车组。国产地铁动车组采用 2 个牵引单元 4 动 2 拖共 6 节车的编组，在每个单元中各设置一个节点，列车总线采用 FSK，车辆总线采用 MVB。列车总线采用双绞屏蔽线，双份冗余；车辆总线近程采用双绞屏蔽线双份冗余，远程采用光纤，光纤采用星型耦合器连接。对于跨车辆连接的光纤，为了可靠也采用双份冗余。

(10) “三茂”内燃动车组。动车组由 4 动 1 拖编组，列车总线采用 WTB，每个车辆设置 1 个节点；车辆中的设备受实际条件限制，分别采用 RS 485、CAN 及 RS 422 等总线方式与车辆控制单元接口。其中：①与司机台显示器、车辆显示器、柴油机油门驱动模块的通信采用 RS 485 总线方式；②与倾摆控制系统的通信采用 RS 422 总线方式；③与柴油机控制装置的通信采用 CAN 总线方式。

(11) 集通内燃动车组。该动车组为 2 动 2 拖双层动车组，采用 Lonworks，全列车只在动力车上设节点，实现了点对点的通信，从而实现了动力车重联控制。

从上述各种动车组来看，T 型网络占主导地位，尤其在各型电动车组上。随着 WTB 技术的引进和国产化，FSK 技术将逐渐退出舞台。在内燃动车组上，在节点数不多的情况下，Lonworks 仍有一定使用空间。由于 Lonworks 的通信

距离较长，对重载货运列车也有用武之地。

5.3.1 T 型网络的 MVB 报文

5.3.1.1 帧的格式

一个主帧由总线主发起，它以主起始分界符开始，其后为 16 位帧数据，接着为 8 位校验序列。16 位数据中 F-code 占 4 位，地址占 12 位。该 F-code 指明从帧的长度和性质，该地址为被指定发从帧的源地址。

一个从帧以从起始分界符开始，接着为 16、32、64、128 或 256 位的帧数据，在每 64 个数据位后包含一个 8 位的校验序列或当帧数据只有 16 或 32 位时，将一个 8 位的校验序列附在其后。

报文由主帧及为响应此主帧而送出的从帧组成。

5.3.1.2 MVB 的基本周期

MVB 的基本周期取值范围为： $1\text{ms} \leq T_{bp} \leq 2.5\text{ms}$ ，式中 T_{bp} 为基本周期时间。一般 MVB 的 T_{bp} 为 1ms 或 2ms，默认值为 1ms。但有的场合为了同步，可使用 2 的幂作为分母来划分控制处理的周期，它的范围在 1~2ms。

一个基本周期分为 4 个相，即周期相、事件相、监督相和保护相。后三者构成偶发相，见图 2.3-132。

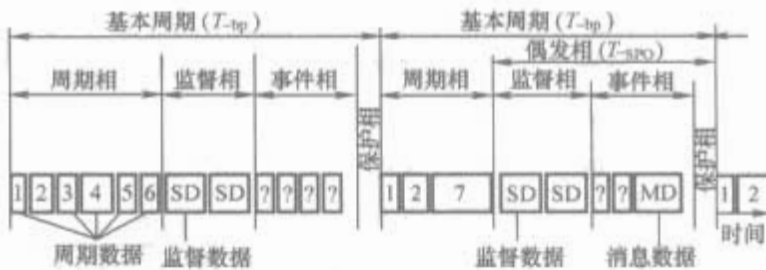


图 2.3-132 MVB 的基本周期

偶发相的时间 T_{spo} 的数值可由用户设置，对基本周期 1ms 而言， T_{spo} 的默认值为 $350\mu\text{s}$ ，即周期相占基本周期的 65%。当传送消息数据的设备没有或很少时，为提高过程数据能力而减小 T_{spo} 。对于从帧为 32 字节过程数据的报文需时 $225\mu\text{s}$ ，若 T_{spo} 为 $350\mu\text{s}$ ，则在一个基本周期中只能传送 2 个过程数据报文；若把周期相扩展至 70%，则在一个基本周期中就可发送 3 个过程数据报文，从而可以减少 MVB 上过程数据的延时。但 T_{spo} 也有一个最小限制，即 T_{spo} 要大于发送最短报文的时间

$$T_{spo} = (49.0 + 42.7) \mu\text{s} = 91.7 \mu\text{s} \quad (2.3-207)$$

式中：49.0μs 为最短报文发送时间；42.7μs 为默认的应答时间。

总线主利用监督相进行设备扫描和主权的传送；在事件相，总线主查询设备状态是否改变及有无消息数据发送。在偶发性发送之后保留的保护相作为缓冲，以保证下一个周期能正确开始。如果要发送的最长响应的的时间大于剩余的到下一个基本周期的时间，则总线将不发送主帧。

5.3.1.3 MVB 设备分类

MVB 上的设备分以下几类：

0 类设备：指一些特殊设备，如中继器和星形耦合器，它们不参与 MVB 上的数据交换。

1 类设备：指具有设备状态功能和过程数据功能。

2 类设备：指具有设备功能、过程数据功能和消息数据功能。

3 类设备：指除具有 2 类设备功能外，还有用户可编程功能。

4 类设备：指除具有 3 类设备功能外，还具有总线管理

功能。
5 类设备：指除具有 4 类设备功能外，还具有 TCN 网关功能。

5.3.1.4 MVB 的帧类型
MVB 上的帧类型由主帧头 4 位 F_code 规定（见表 2.3-50）。

主 帧					从 帧	
F_code	地 址	要 求	源	长度（位）	响 应	目 的
0	逻辑	过程数据	预设为源的单个设备	16	过程数据（由应用决定）	预设为宿的所有设备
1	逻辑	过程数据	预设为源的单个设备	32	过程数据（由应用决定）	预设为宿的所有设备
2	逻辑	过程数据	预设为源的单个设备	64	过程数据（由应用决定）	预设为宿的所有设备
3	逻辑	过程数据	预设为源的单个设备	128	过程数据（由应用决定）	预设为宿的所有设备
4	逻辑	过程数据	预设为源的单个设备	256	过程数据（由应用决定）	预设为宿的所有设备
5			保留	—		
6			保留	—		
7			保留	—		
8	设备	主权的转移	被提议的主设备	16	主权的转移	主设备
9	所有设备	一般事件（参数）	一个或多个设备	16	事件的标识符	主设备
10	设备	保留	—	—		
11	设备	保留	—	—		
12	设备	消息数据	单个设备	256	消息数据	选择的设备
13	设备组	单个事件	一个或多个设备	16	事件的标识符	主设备
14	设备	单个事件	单个设备	16	事件的标识符	主设备
15	设备	设备状态	单个设备	16	设备状态	主设备或监视设备

注 1. F_code 0~4 规定了过程数据的长度，MVB 上帧数据最大长度为 32 字节。
2. F_code 8、15 用于监督相中进行主权转移和查询设备状态。
3. F_code 9、13、14 用于查询和仲裁事件的发生。如有事件发生，从设备只能以 12（有消息数据需传送）或是 15（设备状态改变需要报告）来应答。

5.3.1.5 设备状态扫描

为了监视总线，主设备应定期查询所有设备的设备状态并建立包含每个被发现设备的地址和设备状态的设备列表。主设备应扫描设备列表中列出的已知设备，同时为了检查插入的新设备而扫描未知的设备。主设备对设备的扫描频率为每 512ms 扫描 64 个设备，平均 8ms 扫描一个设备。一般在基本周期的周期相结束时，主设备发 F_code=15 的设备状态请求主帧，被扫描的设备以设备状态响应从帧作应答。当一个设备对连续的 3 个查询均停止响应时，此设备将从设备列表中删除。

5.3.1.6 主权转移

主权转移描述从几个总线管理器中选择一个作为主设备的协议，并保证在一个轮次（turn）结束或故障产生时发生主权转移。

轮次决定了一种轮询的顺序。一个轮次定义为宏周期的数目，在其后必须发生主权的转移。轮次开始时所有挂起的事件均被读出。每个宏周期的最后一个偶发相专为主权的转移而保留，即使在此宏周期中并未用于主权的转移。

每个总线管理器都含有一个所有其他总线管理器的循环列表，称为总线管理器列表。此列表以令牌的传递来排序，最好是以设备地址的升序来排列。

在进行主权转移前，主设备应通过发送一个设备状态请求帧（F_code=15）来读取被提议的主设备的设备状态，以检查被提议的主设备是否处于活动状态并被正确配置。被提议的主设备用一个设备状态响应帧来响应。如果被提议的设备正常，则当前的主设备发送 F_code=08 的主权转移请求帧，被提议的主设备通过发送一个主权转移响应帧来响

应，这样就完成了主权转移操作。若被提议的主设备不正常，则不会发生主权转移，当前的主设备继续执行总线主的任务，直到下一个轮次结束。

5.3.1.7 消息数据的开始发送、仲裁和传送

主设备在周期相结束时通过发送一个 F_code=09 的一般事件请求帧开始一个事件巡回（Event-Round）。一个事件巡回在其开始时收集所有已给定优先级的所有挂起事件的请求。一般事件请求确定了这是一个新的事件巡回（新巡回），而不是上一个巡回的继续，要求立即应答，同时规定了这个巡回事件的优先级。

主设备应在 T_{reply} 时限内区分事件请求响应产生的以下 3 种情况：

- （1）正确。收到了正确的 16 位的从帧数据，表示此时只有一个设备发生事件。
- （2）寂静。没有收到任何帧，表示没有多个设备同时发生事件。
- （3）碰撞。其他任何情况，表示多个设备同时发生事件，需要仲裁。

当碰撞发生时，主设备通过发送一个 F_code=13 的组事件请求帧，将设备地址半分（偶数及奇数）分别进行辨识。如果仍有碰撞，再将设备地址半分，通过组事件请求帧进行辨识，直至收到了单一的正确的 16 位从帧，然后再发 F_code=14 单个事件请求帧，以便把事件读出。在一个事件读出后，还需继续搜索其他的设备地址组，直到完全寂静，该事件巡回才能结束。

一个参与巡回的设备应以事件标识符来响应 F_code=9、13、14 的一个事件请求帧。事件标识符要么是 12（有消

息数据), 要么是 15 (设备状态发生改变)。

若 $F_code=9$, 并且是“立即回答”, 又与优先级相符; 若 $F_code=13$, 并且组地址与此设备的地址相符; 若 $F_code=14$, 并且设备地址与此设备的地址相符, 则从设备将以事件标识符来响应。当主设备接收到正确的从设备事件标识符响应时, 主设备应将该从帧作为事件读取请求帧 (作为主帧) 再次发送, 这样从设备通过事件读取响应就可发送消息数据 ($F_code=12$) 或报告它的设备状态改变 ($F_code=15$)。

为了减少事件仲裁的时间, 产生事件信号的从设备地址范围有限制 (如 1~255), 且最好连续。

事件的优先级分高优先级和低优先级 2 种。高优先级的事件巡回只能被周期相挂起。在高优先级和低优先级均已设置的情况下, 高优先级的事件巡回应在每次低优先级的事件巡回被读取之后开始, 并挂起低优先级的事件巡回; 而低优先级的事件巡回由一个一般事件请求 ($F_code=09$) (不是一个新的巡回, 立即回答) 来恢复。

5.3.2 T型网络的 WTB 报文

5.3.2.1 帧数据格式

WTB 的帧数据格式与 ISO 3309 中定义的 HDLC (高级数据链路控制) 格式一致, 如图 2.3-133 所示。

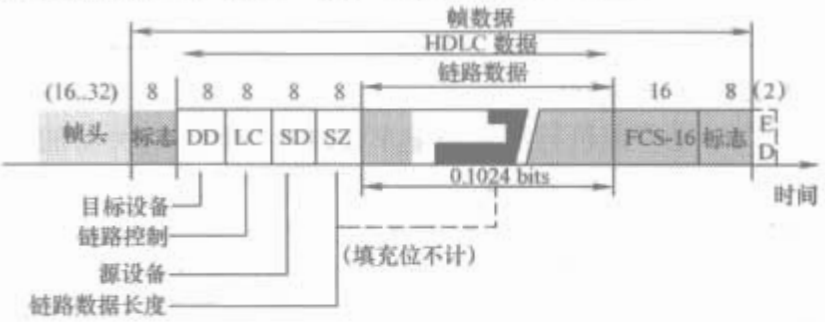


图 2.3-133 HDLC 数据格式

HDLC 数据由开始标志和检查序列 (FCS-16) 之间的数据组成, 不包括填充位, 它是 8 的倍数位。HDLC 数据开始的 4 个字节分别为 DD (目标设备地址或广播地址)、LC (链路控制)、SD (源设备地址) 以及 SZ (链路数据的长度, 字节数)。如果 SZ 为 0, 即没有链路数据。与 MVB 不同, 主节点可以请求自己发送。

在 WTB 上的每个节点只能发送一帧过程数据, 但可以收听其他各节点发来的信息 (广播传送)。

5.3.2.2 WTB 的基本周期

$T_{bp}=25.0\pm1.0ms$, 见图 2.3-134。

一个基本周期分为 2 个相: 周期相——用于传送周期性数据; 偶发相——用于传送监督数据和消息数据。

WTB 的偶发相中不包含保护相, 这意味着下一个基本周期的周期相将可能延时 δ_t 才开始。 δ_t 用于轮询和发送最长可能的消息数据帧或监督数据帧。如果接下来没有其他偶发数据, 再下一个基本周期将按计划的时间开始。

同一节点的 2 个连续轮询之间的间隔叫特征周期 T_{ip}

$$T_{ip}=2^n T_{bp} \tag{2.3-208}$$


图 2.3-134 WTB 的基本周期

即特征周期是基本周期的 2^n 倍。

特征周期由每个节点的应用定义, 根据节点在列车运行中的重要性来选择。每个节点在初运行 (inauguration) 期间, 在它的节点描述中宣告它的特征周期和从帧长度。总线上任何节点的最长的特征周期定义为宏周期。

WTB 规定, 周期相占基本周期的 60%, 即留有 40% 时间给偶发相。用户无法修改这个比例。如果应用确实需要修改这个比例, 则须与节点制造厂协商修改系统源程序, 但这有相当的难度。

5.3.2.3 WTB 上帧的类型

WTB 上帧的类型由帧中的 8 位链路控制字段设定 (见表 2.3-51)。

表 2.3-51 链路控制字段编码		编 码							
数据类型	帧类型	0	1	2	3	4	5	6	7
过程数据和消息数据	过程数据请求/过程数据响应	M	0	A	C	I	0	0	0
	消息数据请求/消息数据响应	M	0	A	C	0	1	1	1
监视数据	检测请求/检测响应	M	1	0	0	0	0	0	0
	状态请求/状态响应	M	1	0	RI	0	0	0	1
	置中间设定请求/置中间设定响应	M	1	0	0	0	0	1	0
	置末端设定请求/置末端设定响应	M	1	0	0	0	0	1	1
	消名请求	M	1	0	0	0	1	0	0
	命名请求/命名响应	M	1	0	0	0	1	0	1
	拓扑请求/拓扑响应	M	1	0	0	0	1	1	0
	存在请求/存在响应	M	1	0	RI	I	1	1	1

链路控制字段区分:

(1) 请求帧 (主帧) 和响应帧 (从帧)。表 2.3-51 中 bit0 在请求帧中为“1”, 响应帧中为“0”。

(2) 3 种类型的报文。bit1 为 0, 表示过程数据和消息数据; bit1 为 1, 表示监视数据; bit5~bit7 为各种帧的具体编号。监视数据的 8 种类型就是靠这 3 位编码识别的。bit1、5、6、7 四位全为 0, 表示过程数据报文; 而 bit1 为 0, bit5、6、7 都为 1, 表示消息数据报文。

链路控制字段允许被轮询的节点通过下列 4 个标志 (bit2、3、4 中) 发送偶发传送请求、状态变化或初运行状况的信号: “A” 位——请求发送消息数据; “C” 位——节点状态变化, 请求发送监视数据, 将通过状态请求/状态响应帧来完成; “I” 位——禁止初运行; “RI” 位——远程禁止初运行。

5.3.2.4 消息数据的开始发送和传送

WTB 上每个节点在总线主轮询时可以发送一个过程数据帧, 每个节点也只能有一帧过程数据帧。与 MVB 总线主不同, WTB 上的总线主可以进行自轮询, 亦即主节点也可发送一个过程数据帧。

只要消息数据的发送序列包含待发送的帧，过程数据和消息数据报文中的链路控制字段“A”位将置 1。过程数据中的“A”位置 1 表示它有消息数据待发送；而消息数据中的“A”位置 1 表明该消息数据尚未发送完。总线主将“A”位置 1 的设备地址插入消息列表中，以便在偶发相中轮询它（也可包括总线主自己）的消息数据。消息数据的目标地址可以是单个节点地址（单播）或广播地址。当消息数据中的“A”位置 0 时，总线主将从消息列表中删除该节点地址。

如果有几个节点同时宣布有偶发性传送（“A”或“C”位置 1），总线主将以巡回的方式处理这些要求。这样在一个节点被再次服务前，所有其他的请求已响应。特别要指出的是所有监视数据请求（“C”位置 1）将在消息数据请求（“A”位置 1）之前处理。

5.3.2.5 网络自动重构

网络自动重构是 WTB 特有的功能，是列车组成改变时执行的操作。它通过初运行给出 WTB 上所有节点相对于总线主的地址、它们的取向及同一总线中所有已命名节点的描述符。

WTB 上的节点有强节点、弱节点和从节点之分，一般把没有司机室的车辆节点设为从节点。弱节点可由应用操作（例如司机钥匙插入）提升为强节点，成为总线主而执行总线管理主权。强节点亦可由应用操作降为弱节点。

初运行进程保证总线由一个，也只能由一个总线主来控制。对 32 个节点，TCN 初运行须在 1s 内完成。如果因发生错误而须重复初运行协议，则全部初运行时间最大不超过 1.4s。

初运行开始，总线主对组成中所有其他节点连续 3 次消名后；接着总线主交替地在方向 1 和方向 2 上给节点命名，在方向 1 上按递减次序（63、62 等），而在方向 2 上按递增次序（2、3、4 等）。总线主的地址恒为 1。

每个附加节点的纳入需要 4 个报文：

- (1) 状态请求/状态响应。
- (2) 检测请求/检测响应（插在上项报文中间）。
- (3) 置中间设定请求/置中间设定响应。
- (4) 命名请求/命名响应。

当端节点对连续 3 次状态请求没报告有更多的节点，总线主将结束初运行。

总线主将根据每个节点所希望的周期及帧的长度计算新的周期扫描表和每个节点的特征周期，并为所有节点建立拓扑，其数据结构包括地址、节点类型和版本号以及唯一标识这次初运行的总线主拓扑（拓扑计数器的值）；然后总线主通过一拓扑请求帧给每个节点分别分发拓扑，每个从节点通过拓扑响应帧对此响应。当所有节点都确认已收到新的拓扑后，再等待一个基本周期，然后进入常规运行，开始轮询节点的过程数据。

5.3.3 T 型网络的网关

5.3.3.1 网关组成

网关（节点）的主要作用是实现列车总线与车辆总线（如 MVB）间的协议转换，同时它可担任 MVB 的总线主实现对 MVB 总线的管理。主节点还担负着 WTB 列车总线的管理。

每个节点通过 WTB 只能发送一帧过程数据，但可收听所有其他节点发送的数据。节点还通过车辆总线接受本车各设备发来的数据。对于本车设备发来的数据，有一部分是内部设备需要的，这些数据不通过列车总线传送。节点的任务是将内部设备发来的数据进行分解和重新组合，形成发往

WTB 的数据帧；同时把从 WTB 和 MVB 接收的数据进行分解，重新整理组合，将相关数据通过 MVB 发往有关的设备。

T 型网络的网关已在许多动车组中批量使用。它由 4 种插件组成，从左向右依次为 CPU、WTB、MVB 及电源 PSU 插件。前 3 种通过 VME 总线交换信息，除电源插件占 2 个板位外，其余只占一个板位。网关的主要参数见表 2.3-52。

表 2.3-52 网关的主要技术参数

参 数		指 标
外形尺寸 (mm×mm×mm)		305×140×132
印制电路板 (mm)		高 3U，宽 160
直流输入电源	电压 (V)	110
	功率 (W)	最大 15
印制电路板供电 (V)		DC5
温度范围 (℃)		−40~+70
接口		WTB, MVB
串行接口		RS422/RS485 最高数据传输率至 115.2kbit/s
ISaGRAF 及 PST 接口		9600 bit/s, RS232C

5.3.3.2 CPU 插件

CPU 插件能执行扩展的拖车计算机功能、网关功能及拖车应用功能，具有处理 500 个源变量及 7500 个宿变量的能力。网关功能中数据总线间的最大延时为 20ms。它采用摩托罗拉的强大 QUICC 处理器 MPC860，它位于子板中，扣在主板上。CPU II 插件的功能框图如图 2.3-135 所示，其主要技术参数见表 2.3-53。

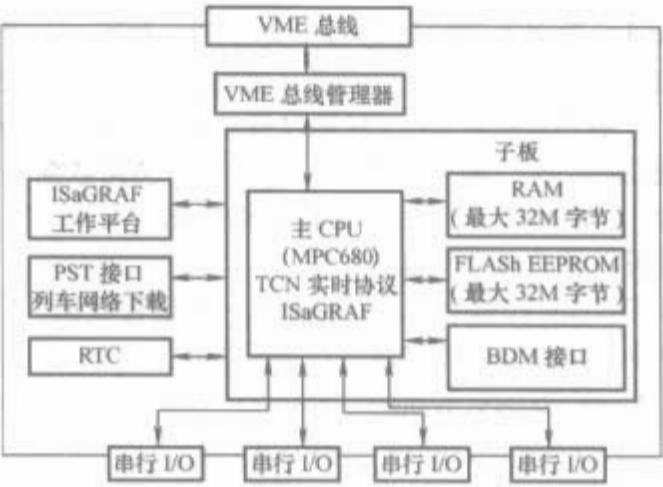


图 2.3-135 CPU II 插件框图

表 2.3-53 CPU 插件主要技术参数

参 数	规 格
尺寸	4TE×3U×160mm (W×H×D)
直流输入电源 (V)	DC5×(1±5%)
温度范围 (℃)	−40~+70
串行 I/O	对外 3 通道
数据传输速率 (Mbit/s)	最高至 10
协议	异步或基于 SDLC (串行数据链路控制)，与应用有关 (Modbus, BITBUS, FIP, Profibus 等)
电气标准	光隔的 RS232C、RS422 或用 RS485

续表

参 数	规 格
VME (通用模块欧卡) 总线 (IEC 821) 接口 A24/D16 有仲裁逻辑的总线主 ISa- GRAF (软 PLC 开发工具) 接口	9600bit/s, RS232C
PST (便携式系统测试仪) 接口	9600bit/s, RS232C

注 ITE=5.08mm。

5.3.3.3 WTB 插件

WTB 插件实现 IEC61375-1 列车通信网络标准的 WTB 链路层功能，它提供的映射服务器（位于 CPU 插件上）具有访问 WTB 必需的所有原函数。WTB 插件支持 IEC61375-1 规定的电缆冗余，前面板上的 D 型 9 针插座，用于连接列车总线，而通过 VME 背板总线与 CPU 交换信息。WTB 插件的框图如图 2.3-136 所示，其主要技术参数见表 2.3-54。

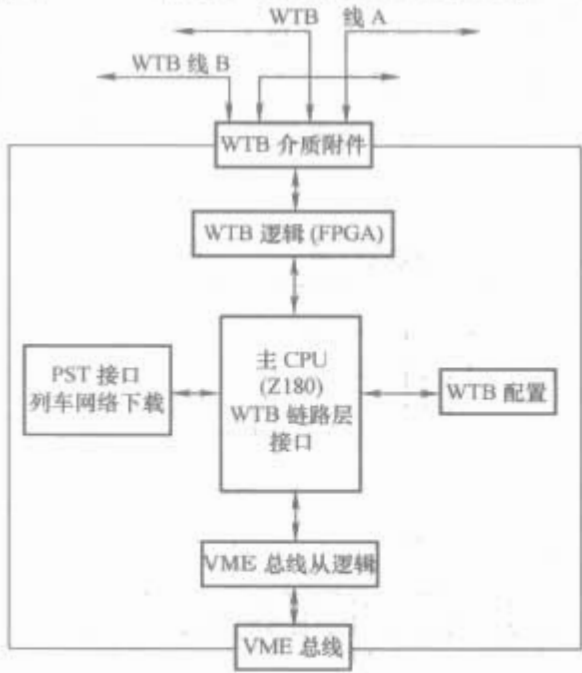


图 2.3-136 WTB 插件框图

表 2.3-54 WTB 插件主要技术参数

参 数	指 标
尺 寸	4TE×3U×160mm (W×H×D)
直流 输入电源	电压 (V) 5× (1±5%)
	电流 (A) 最大 1, 典型 0.5
可靠性 (h)	500 000 (25℃)
工作温度范围 (℃)	-40~+70
列车总线	WTB
数据传输速率 (Mbit/s)	1.0
介质附件	变压器隔离、组合式或单个总线连接器，支持冗余，电缆屏蔽层内部接地
VME 总线接口	A24/D16、256KB DPRAM (双口 RAM) 用于过程数据和消息数据

5.3.3.4 MVB 插件

MVB 插件实现 IEC 61375-1 列车通信网络标准的 MVB 链路层功能，它提供的映射服务器（位于 CPU 插件上）具有访问 MVB 必需的所有原函数。MVB 插件支持 IEC 61375-1 规定的全部总线主的功能，也支持总线主冗余和主权转移功能。MVB 插件通过面板上的 D 型 9 芯插座与外部电缆连接 (ESD+)，支持车辆总线双线冗余，通过 VME 背板总线与 CPU 交换信息。MVB 插件的框图如图 2.3-137

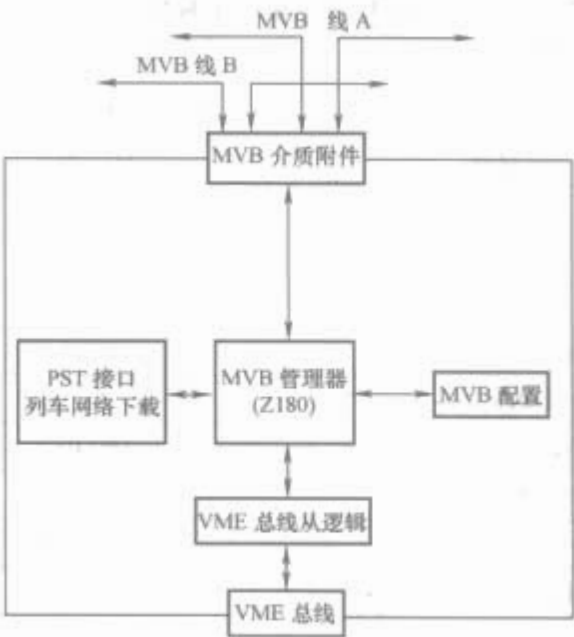


图 2.3-137 MVB 插件框图

所示，其主要技术参数见表 2.3-55。

表 2.3-55 MVB 插件主要技术参数

参 数	指 标
尺 寸	4TE×3U×160mm (W×H×D)
直流 输入电源	电压 (V) 5× (1±5%)
	电流 (A) 最大 1, 典型 0.5
工作温度范围 (℃)	-40~+70
车辆总线	MVB
数据传输速率 (Mbit/s)	1.5
介质附件	光隔 (ESD+)，组合式或单个总线连接器，支持冗余，电缆屏蔽层内部接地
VME 总线 (IEC821) 接口	A24/D16、256KB DPRAM 用于过程数据和消息数据

5.3.3.5 PSU 插件

PSU 插件（见图 2.3-138）是为车载应用专门设计的开关电源模块，它有一些专门措施来提高电源及其供电系统的可靠性和安全性，它提供 SYSRESET 和 ACFAIL 信号支持总线功能，在非正常情况下，它帮助系统以协调的方式关断。PSU 在外部供电电源上升时可以控制吸入的电流，在外部供电电压中断时可继续供电 10ms。其主要技术参数见表 2.3-56。

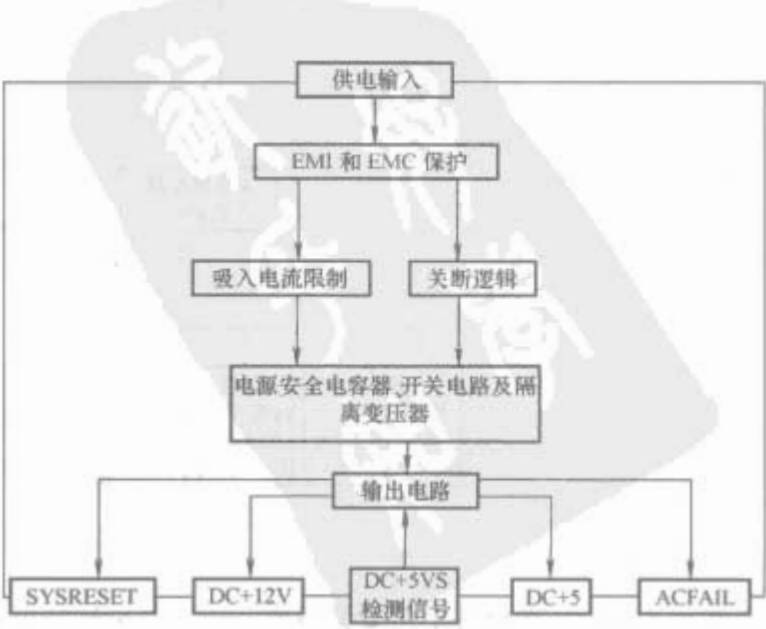


图 2.3-138 PSU 插件框图

表 2.3-56 PSU 插件主要技术参数

参 数		指 标
尺寸		8TE×3U×160mm
连接器		H15 型
质量 (g)		500
可靠性 (h)		600 000 (25℃)
工作温度 (℃)		−40~+70
供电输入 (A)		吸入电流限制到 10
电源中断 (ms)		10
标称输入电压 (V)		DC110
输入电压范围 (V)		DC77~138
输入电压波动 (1s) (V)		DC66~154
输入电流 (<1s) (A)		2 (最大)
输入功率 (W)		100 (最大)
效率 (%)		>78
输出功率 (W)		80
DC5V 输出	最大输出电流 (A)	13
	最小输出电流 (A)	0.5
	纹波 P-P (mV)	50 (<20MHz)

续表

参 数		指 标
输出电压 (V)		DC 5.15×(1±2%) DC5.0 最小
DC12V 输出	输出电压 (V)	DC12.10×(1±2%) DC11.8 最小
	输出电流 (A)	1.25 最大
	纹波 P-P (峰-峰) (mV)	50 (<20MHz)

5.4 列车控制、诊断和显示

5.4.1 动力集中型电动车组的网络拓扑

动力集中型电动车组首尾为动力车、中间为拖车。原则上每个车辆都设一个节点。以“中华之星”为例，它是 2 动 9 拖的编组，除在两端动力车司机室里设置显示屏外，在中间拖车的酒吧车上中央控制室里还设有显示屏，用来查看各拖车的数据和状态。由中央控制室可以集中控制，也可以控制某个车辆的空调、逆变器及供电设备。“中华之星”电动车组 WTB 网络拓扑见图 2.3-139，列车总线采用双份冗余。

图 2.3-140 所示为动力车控制与网络系统拓扑图。中央

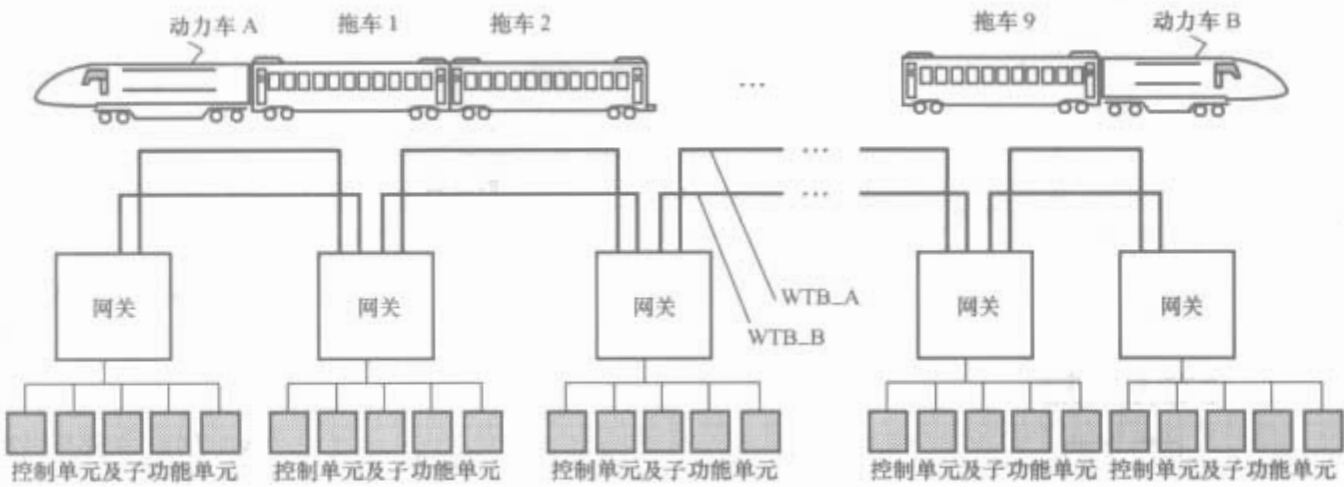


图 2.3-139 “中华之星”动车组 WTB 网络拓扑图

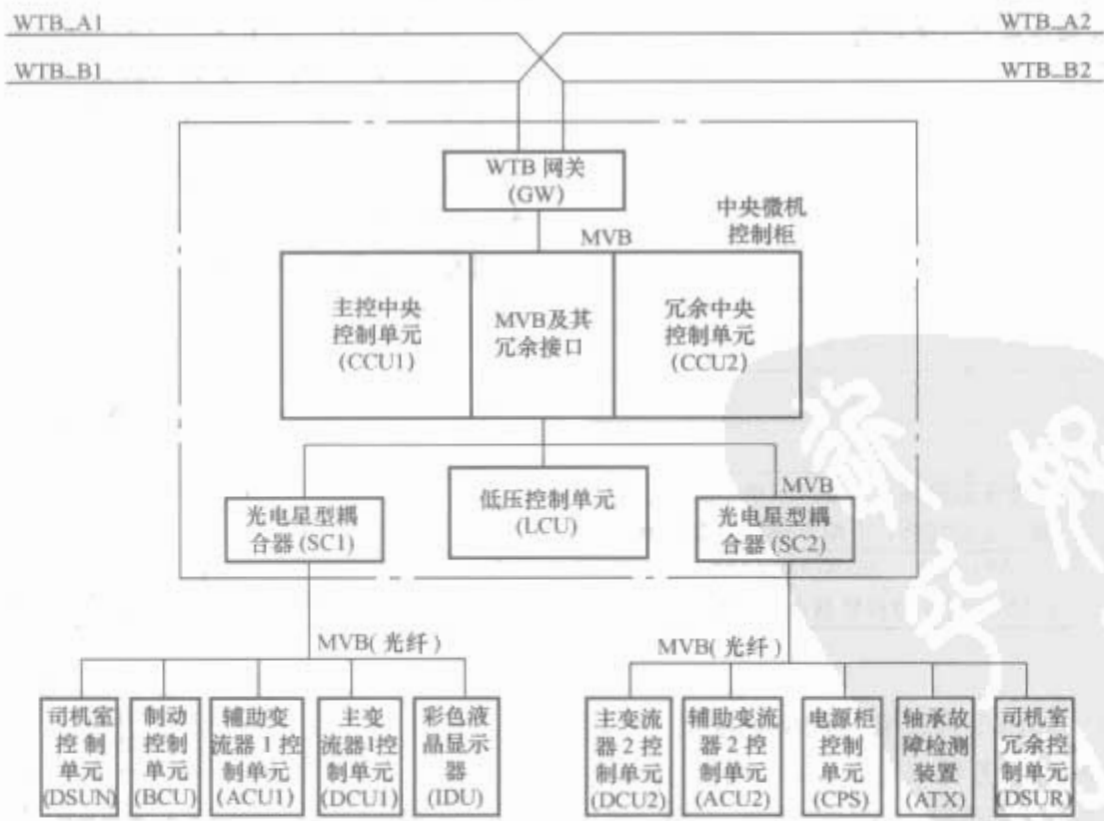


图 2.3-140 动力车控制与网络系统拓扑图

控制单元 (CCU) 在硬件上由 2 套组成，正常时由软件设置 CCU1 为默认的主中央控制单元，CCU2 热备。当 CCU1 出

现故障时自动转换到 CCU2 继续工作。当 CCU1 和 CCU2 都出现故障时，只要 CCU1 和 CCU2 中剩余的插件能组合一套

CCU，它们能自动组合成一套 CCU 执行控制、通信及故障诊断，在自动切换时实现控制无缝转换。

通过网络通信，主要实现以下控制功能：

- (1) 动力车逻辑控制。动力车逻辑控制包括司机控制指令的接收及合理性判断、受电弓控制、主断路器控制、牵引/制动联锁控制、停放制动、低压接触器控制、自动换端控制、司机室牵引运行状态的显示等。
- (2) 牵引特性控制及制动特性控制。根据司机控制器级位，牵引时设定速度、制动时设定制动力相对制动黏着限制线的百分含量。全列车的牵引力由操作车的中央控制单元根据牵引/制动特性进行计算，然后分配给每个动力车的转向架。
- (3) 定速控制。根据当前实际速度及前方线路变化，进行牵引力调节，定速控制精度小于或等于 2km/h。
- (4) 辅助系统控制。根据辅助变流器的状态进行相应负载的配置；向辅助变流器发送启动、关闭及变频指令；当辅助变流器故障时施行故障切换控制；实现库内供电时的测试。
- (5) 自动过分相控制。设置 3 种模式，即自动、半自动和手动，以适应不同的线路区段。
- (6) 重联控制。
- (7) 故障诊断和显示。

图 2.3-141 所示是拖车网络系统拓扑图。VCU（节点）为一 3U 机箱，内装网关及数字 I/O 插件，用于对拖车车辆总线的管理。车辆内 MVB 上的设备，有的采用光纤介质，有的采用 EMD 双绞屏蔽线。通过 WTB 司机可控制和监测客车中的设备，主要包括车门控制、照明控制、逆变器控制、空调控制、客车制动系统的控制、烟火报警处理以及客车信息的集中显示与故障诊断。客车的集中控制通过酒吧车上的主控制节点，借助 WTB 及各拖车 VCU 进行。



图 2.3-141 拖车网络系统拓扑

5.4.2 动力分散型电动车组的网络拓扑

动力分散型电动车组由于动车数量较多，为保证各动车在 WTB 一个基本周期内（25ms）都被访问到，最好一个牵引单元设置一个节点。一般动车的访问周期为一个基本周期，而拖车的访问周期可以多至 4 个基本周期（100ms）。一个牵引单元由 2 节动车和 1 节拖车组成。扩编后的“中原之星”共有 14 节车辆，除了两端带有司机室的两个牵引单元外，中间 2 个单元上还各加上了一节客车。

一个牵引单元的计算机网络构成如图 2.3-142 所示，全列车有 4 个牵引单元，通过 FSK 连接各个单元的网关。

司机所在的牵引单元为全列车的主控制单元，其网关 GW 实现列车总线的管理及两层总线间的协议转换。网关放在 CCU 中。

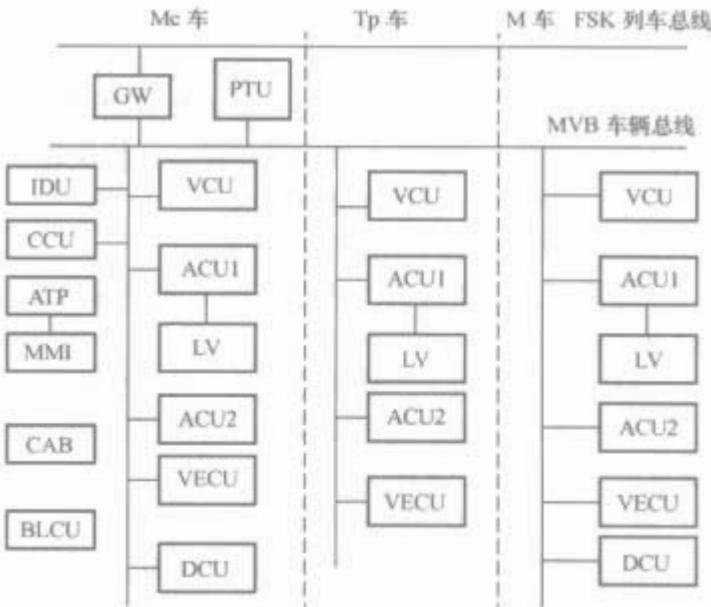


图 2.3-142 一个牵引单元的计算机网络构成

ACU—辅助电源控制单元；ATP—自动列车防护；BLCU—制动逻辑控制单元；CAB—司机室操纵和显示灯装置；CCU—中央控制单元；DCU—传动控制单元；GW—网关；IDU—智能显示器；LV—充电器；MMI—ATP 的显示器；PTU—便携式测试工具；VCU—车辆控制单元；VECU—客车电器控制单元

CCU 负责列车重联控制、车辆总线管理、列车级控制和列车故障诊断。CCU 根据司机的指令以及列车的状态信息，经过逻辑处理后，形成列车控制命令并发布到全列车各个有关的控制单元；把列车运行的状态以及故障信息通过司机台指示灯和显示屏反馈给司机或维护人员。

VCU 负责本车辆内的设备控制和监视。VCU 控制和监视的对象主要是受电弓、主断路器、辅助电源及其切换开关、牵引变压器、空气压缩机、辅助压缩机、各种辅机开关、总风压力、制动缸压力及制动系统状态等。

VCEU 负责客车侧门、轴温、空调、照明等设备的控制与监视。

DCU 负责主变流器和牵引电动机的控制，可分为上下 2 层功能：上层的控制功能包括牵引特性控制、黏着控制、轮径补偿、解锁逻辑、有关接触器控制等。下层由 2 个控制器即四象限变流器控制器（LCC）和脉宽调制变流器控制器（MCC）构成，前者负责中间直流环节电压恒值控制，并使电网的功率因数尽可能接近 1；后者控制逆变器的输出电压和频率，使牵引电动机的输出转矩与下达的指令一致，同时执行空转/滑行保护。

ACU 控制辅助变流器，把贯穿全列车的直流电变换为本车辆各种辅机需要的三相交流电源。图 2.3-142 中 LV 为蓄电池充电器，它通过 RS485 串行通信总线与 ACU1 连接。

显示器 IDU 作为人机交互界面显示各种信息，IDU 记录的数据可以转储，以便地面处理。

图 2.3-142 中的 ATP 为车载列车自动保护装置，根据地面信号和列车速度对列车实施超速保护。其最重要的输出是紧急制动，它的输出直接用硬连线送至相关设备。ATP 通过 CAN 总线与其显示器（MMI）相连。

5.4.3 网络的发展趋势

通过几年来的实践，网络通信的技术日趋成熟，现在朝着全分布式、模块化、标准化的方向发展：一是通信模块尽量放置在现场，以使布线简单；二是车辆内的 VCU、显示屏以及开发维护工具尽量统一考虑，使之能适合内燃牵引、电力牵引以及客车的要求。

最近开发的一些模块（或装置），应用于轨道交通领域

的分布式列车通信与控制系统（缩写为 DTECS）。每个模块或装置都是一个相对独立的实体，各模块或装置通过 MVB（IEC 61375-1MVB）连接。各模块或装置都封闭在一个封闭的机械结构中，具有自己的电源和通信接口。模块易于直接安装在机车车辆中，并能靠近处理对象。

DTECS 系统支持以下几种冗余形式：

- （1）通道冗余。如重要的信号采用不同的输入/输出模块的通道冗余控制。
- （2）模块冗余。如 I/O 模块的冗余、处理模块的冗余。
- （3）总线冗余。如车辆总线和列车总线的冗余。介质可以是 ESD+，EMD 或 OGF。

DTECS 有 3 种模块和一种装置：

（1）车辆控制模块（VCM）。它提供运算、存储、通信资源，其组成如下：

- 1) 采用 32 位嵌入式工业微处理器 IXP425，主频 233~533MHz。
- 2) FLASH 容量 48~128M 字节（选项）。
- 3) SDRAM 容量 32~128M 字节（选项）。
- 4) MVB ESD+接口。
- 5) 具有 RS232、RS485、CAN、USB、以太网接口。
- 6) 3U 独立模块，封装在 IP42，具有散热、抗振和 EMC 功能的机械结构中。
- 7) VxWorks 5.5 实时操作系统。
- 8) MVB 4 类设备。具有列车网络管理 TNM 的总线管理器代理者的功能。

（2）智能显示装置（IDD），它提供人机界面，其组成如下：

- 1) 采用 32 位嵌入式工业微处理器 PXA 255，主频 300MHz。
- 2) FLASH 容量 32~64M 字节（选项）。
- 3) SDRAM 容量 32~64M 字节（选项）。
- 4) MVB ESD+接口。
- 5) 具有 RS232、RS485、USB、CAN、以太网接口。
- 6) 具有 IC 卡。
- 7) LINUX 操作系统。
- 8) MVB3 类设备，具有列车网络管理 TNM 的相关代理者的功能。
- 9) 具有图形编程界面支持。

（3）数字量输入/输出模块（DXMD）。它提供数字量输入/输出通道，其组成如下：

- 1) 16 个 110V 输入通道。
- 2) 8 个 MOSFET 输出通道。
- 3) 具有通道自检功能。
- 4) MVB ESD+接口。
- 5) MVB1 类设备。具有过程数据和设备状态响应功能。
- 6) 3U 独立模块。封装在 IP42，具有散热、抗振和 EMC 功能的机械结构中。

（4）便携式测试装置（PTD）。它提供开发、调试、维护手段，其组成与功能如下：

- 1) PTD 转换盒。采用 32 位 ARM7 嵌入式工业微处理器；MVB ESD+接口；USB 接口；封装在 IP42，具有散热、抗振和 EMC 功能的机械结构中，携带方便。
- 2) PC 机。采用 LINUX 和 Windows 操作系统；MVB4 类设备，具有列车网络管理 TNM 的经营者功能；具有图形编程界面支持。
- 3) 具有程序从 PTD 下载到 VCM、IDD 功能；具有数

据从 VCM、IDD 上载到 PTD 功能；MVB 总线上过程数据监视和在线强制。

5.4.4 200km/h 动车组（从日本引进）的通信网络

铁道部从日本采购了 60 列速度为 200km/h 的动车组以及 60 列速度为 300km/h 的动车组，这些动车组的通信网络不同于 IEC 61375-1 的 TCN 列车通信网络。IEC TC9 已同意将日本的 TIMN（列车信息管理网络）作为车辆总线之一着手起草国际标准，因而有必要对 200km/h 动车组的通信网络作一简单介绍。

200km/h 动车组由 4 动 4 拖编组组成，其中 2、3 和 6、7 号车为动车。1 车和 8 车为带司机室的拖车，4、5 号为不带司机室的拖车。2 列动车组可以联挂编组成一列 16 节车的动车组。每节车中都设有终端装置，首尾车中还设有中央装置。终端装置和中央装置起“节点”作用，由中央装置负责列车总线的管理，终端装置负责本车车辆总线（日本称本地总线）的管理。

动车组内部的 8 节车辆，由于是固定连接，列车总线采用光纤作介质。2 列动车组间的列车总线采用以双绞屏蔽线作介质的电连接，以保证通信的可靠性。8 节车的光纤连成环形结构，在一路光纤传送故障时，不会影响列车的运行。此外，它还设有自诊断总线，采用双绞屏蔽线作介质，它有 2 个通道，平时由通道 1 进行传送，通道 2 进行监视；当通道 1 有故障时，通道 2 才进行传送；当通道 2 检测到通道 1 已恢复正常时，则仍由通道 1 负责传送。自诊断总线在环形光纤总线 2 路都失效时，也传送一些列车运行必须的数据，以保证列车继续运行。

（1）列车总线。列车总线的主要技术参数见表 2.3-57。

表 2.3-57 列车总线的主要技术参数

参 数	规 格
适用标准	ANSI 878.1 “ARCNET”
数据传输速率 (Mbit/s)	2.5
总线结构	环形
电源电压 (V)	DCU5
接口	TTL 电平
光纤 (μm)	GI 50/125
光纤连接器	FO-JC (FC) 型

（2）自诊断总线。自诊断总线的主要技术参数见表 2.3-58。

表 2.3-58 自诊断总线的主要技术参数

参 数	规 格
介质	双绞屏蔽线 1.25mm ²
通信方式	单方向使用双线式半双工的 H/V
数据传输速率 (bit/s)	38400±0.1%
信号	曼彻斯特码
线路电压 (V)	DC24×(1±30%) (120Ω 终端电阻)
接口连接	多站点总线连接
同步方式	位同步方式 (DPLL)
传输格式	HDLC (地址 16 位)
节点工作模式	主局模式 (接收全部数据) — 以确保可扩展性
同步代码	开放式 PAD (标志为 7EH)
传送周期 (ms)	通道 1 10 通道 2 20
无信号接收的判定时间 (ms)	50
FCS	CRC-CCITT-1

(3) 车内节点与设备的连接。车内节点与设备的连接有 3 种形式：光纤连接，如主变流器和制动控制单元；20mA 电流环路，如空调控制器、显示控制装置、IC 卡、距离测定装置、车侧面到达显示器、车内引导显示器等；直接硬线连接，如配电盘、速度传感器（SG）、地点检测器。其主要技术参数见表 2.3-59。

表 2.3-59 车内节点与设备连接主要技术参数

参 数		指 标
光纤连接	适用标准	EIA485/ISO 3309/4335 “HDLC”
	数据传输速率 (bit/s)	19 200× (1±10.1%)
	通信方式	二线式半双工
	帧格式	HDLC
	通信周期 (ms)	10
	信号	NRZI (反向不归零制)
	介质	光纤 H-PCF200/230
	光纤连接器	JIS F-07
	FCS	CRC-CCITT-1
20mA 电流环路	适用标准	EIA 485/ISO 3309/4335 “HDLC”
	数据传输速率 (bit/s)	9600× (1±0.1%)
	通信方式	4 线式半双工
	线路电流 (mA)	“1” 17~23 “0” 0~2
	线路电压 (V)	DC 24× (1±5%)
	同步方式	同步传输
字符长度 (bit)	起始位	1
	数据位	8
	偶校验位	1
	终止位	1
连接方式		链式连接
FCS		CRC-CCITT-1
直接硬线连接		如配电盘、速度传感器 (SG)、地点检测器、解编与连挂装置等

(4) 主要设备。这里通信网络的主要设备指中央控制单元、终端装置、车辆信息显示器、IC 存储卡，其主要技术参数见表 2.3-60。

表 2.3-60 主要设备技术参数

参 数		指 标
中央控制单元、终端装置	CPU	MC 68360
	ROM (MB)	4
	RAM (MB)	2
车辆信息显示器	显示画面	10"彩色 LCD8 色
	像素 (点)	840×480
	显示文字数	24 行，每行 40 字
	输入	光电式触摸输入方式
IC 存储卡	方式	非接触式
	型式	RT256KB/AVS (或者 RT-512KB/AVS)
	记忆容量 (KB)	256 (或者 512)

5.4.5 故障诊断和显示装置

故障诊断的作用是在某个设备故障或失效时，及时采取必要的措施，并把此信息通知司机，以防事故的发生和缩小故障范围。它是保证安全必需的手段，对查找故障原因、缩短维修时间具有重要作用。

电子产品的故障分为 2 类：一类是不影响安全的故障（故障率为 $\sum\lambda_s$ ）；另一类为有危险的故障（故障率为 $\sum\lambda_D$ ）。诊断系统主要是针对有危险性故障，设在有危险的故障 $\sum\lambda_D$ 中。如果诊断系统能诊断出 $\sum\lambda_{DD}$ ，则该系统的安全故障率为 $(\sum\lambda_{DD} + \sum\lambda_s) / (\sum\lambda_s + \sum\lambda_D)$ ，诊断覆盖率为 $\sum\lambda_{DD} / \sum\lambda_D$ 。

根据 IEC 61508—2：2000《电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全》第二部分，对系统的安全故障率有明确规定：对于一个尚不太成熟的系统，SIL3 系统的安全故障率必须达到 90%~99%，而对危险性故障的诊断覆盖率应达到 90%。而对于 SIL4 系统的安全故障率必须达到 99%，其诊断覆盖率应达到 98%。

目前，机车上的诊断装置主要是全面监测和采集反映机车运行状态的参数和数据，进行实时在线处理和非实时的离线处理。实时在线处理包括对车辆运行事件的自动记录、状态参数的自动判别、故障的自动分析及报警显示、数据记录的存储控制；非实时的离线处理包括地面数据转储、机车运行数据的地面回放、对记录的故障及详细历史数据进行分析、诊断等。

我国在机车车辆上的故障诊断还处于较低的水平。在计算机方面，一般可以做到上电时对 CPU、存储器以及它控制的外设（如数字 I/O、模拟 I/O）进行诊断；静止时测量各种传感器的静差；在运行中采用比较法周期性地对各种传感器进行诊断，对主变压器油温进行监视，超温时进行报警、降功，对于轴承温度可以超温报警和记录数据；在走行部分可以诊断轴承故障及齿轮、踏面损伤；在出现保护动作时，可以记录故障前和故障后一段时间内所有模拟量和数字量数据，以便事后进行故障原因分析。

高速列车的主要运行功能都必须连续自动监测，并且监测功能本身在一定时间间隔内也定期地被自动测试。主要运行功能，如司机室信号、牵引传动的控制、制动、转向架的稳定性等都需要有相应的监测诊断措施。一旦出现异常，必须采取果断的措施；对于所有可能危及运行的故障，诊断覆盖率必须大于 90%。

诊断系统应根据部件的重要程度和故障危害等级形成整列车的评估逻辑；在几种故障同时发生时，确定整列车故障等级的升级。

在诊断处理上一般可以分成 3 个层次：

(1) 快速反应层次。与故障相关的部件应能迅速采取故障隔离措施，以防事故扩大。

(2) 综合反应层次。通过列车通信网络，各部件把故障信息与环境参数报告给列车主控单元，并在显示屏上显示，由司机决定下一步如何操纵列车。

(3) 面向管理层次。将故障发生前后一段时间内的数据及环境参数记录下来供维护分析及管理用。

机车上用的显示屏作为人机交互界面最早为黑底橘红色显示的等离子体显示屏，由于其对视觉刺激，易产生疲劳，且显示内容有限，后改用 TFT 彩色液晶显示屏。车上的显示器为 TPX 系列，包含有 TPX3、TPX5、TPX5A、TPX6-L、TPX6-M、TPX10A、TPX10E、TPX12、TPX12B、TPX14 等。TPX 系列中的显示屏是相同的，在硬件上通信

接口有所不同，有的用 RS485 标准，有的用 CAN 标准、Lonworks 标准，也有用 MVB 标准的。在软件和显示画面上，则随着车型不同而不同。显示的主屏是正常运行时所必需显示的参数，通过功能键可翻阅其他显示内容，查阅故障履历或设置参数。

机车显示器及显示屏的主要技术参数见表 2.3-61。

表 2.3-61 显示器和显示屏的主要技术参数

参 数		指 标
显示器	供电电源 (V)	DC+77~DC133.5
	功 率 (W)	小于 25
	外形尺寸(mm×mm×mm)	405×332×120
	质量 (kg)	6.5
	主 CPU	80486、主频 66MHz、内存 4KB
显示屏	型号	LQ10D345 或 LQ10D421 (TFT)
	分辨率	640×480
	显示面积 (mm)	212×158
	亮点直径 (mm)	0.33
	亮度 (cd/m ²)	300
	水平视角	120°
	垂直视角	90°
	工作温度 (℃)	0~55
	散热方式	自然冷却

传感器取得信号，经信号调整使其量值适合于 A/D（模数转换）变换的范围，再供 CPU（中央处理器）采样；数字信号经光电隔离后送 CPU。计算机根据预定的程序对这些模拟量和数字量进行处理和监测，再经 D/A（数模转换）变换输出模拟控制信号，经继电器隔离输出数字控制信号，经脉冲控制器和功率放大，输出晶闸管触发所需的脉冲。通过键盘和显示器进行人机对话，司机可获得机车的各种信息。

5.5.1.2 组成及功能

微机控制系统由微机柜及装在司机台上的显示器（包括按键）组成，对机车采用分级控制。

(1) 人机对话级。CPU 原为 V20，配等离子体显示屏，采用汇编语言编程以提高屏幕响应速度。后来改用 80486CPU，配 TFT 彩显，采用 C 语言编程，便于移植到不同车型上。

(2) 机车性能控制级。CPU 为 80186，采用 FUPLA 功能块语言编程，便于移植到其他车型上。

(3) 变流器控制级。CPU 为 80196（原为 8097），采用汇编语言编程，以满足晶闸管快速实时控制的需要。

级间通信采用 RS485 通信标准，CPU 为 8031。

图 2.3-144 所示为 SS8 机车控制箱插件组成及板位分布。不同车型的插件箱，其插件数量和位置可以有所不同，但相同的插件是可以互换的。

母板 (AMS BUS)													
01	05	09	25	29	33	37	41	49	53	57	61	65	69
转换控制	信号调整 1	电 源	备用板位	脉冲放大 2	脉冲放大 1	信号调整 2	脉冲控制器	试验连接	备用板位	备用板位	数字量入出 R	数字量入出 A	模拟量入出
													73
													信息记忆传送
													77
													单板机

图 2.3-144 控制箱插件组成及板位分布

注：控制器总线采用 RS485。

(1) 电源插件。该插件的主要技术参数见表 2.3-62。

参 数		指 标
输入直流电压 (V)		77~137.5 (标称电压 110)
输入过电压保护动作值 (V)		140~145
输入欠电压保护动作值 (V)		68~70
直流输出	电压 (V)	+5 ±15 ±24
	电流 (A)	5 2.2 7.3
效率 (%)		>70

电源插件为本插件箱中的插件提供电源，此外它还向电压、电流传感器提供±24V 电源，向速度传感器和司机控制器电位器提供+15V 电源。

(2) 单板机 (SBC) 是机车性能控制级的核心。主 CPU 为 80186。插件的上部 96 芯插头连接 AMS 总线，下部为 48 芯插头用于对其他插件的连接。AMS 总线是一种国际标准化总线，其信号以及操作规范与 INTEL 定义的 MULTIBUS (IEEE 796) 基本相同，只是印制电路板的尺寸与连接器不同。另外，用 2 组±15V 电源代替了 MULTIBUS 的±12V 电源。单板机插件上还有负责级间通信的 CPU8031，它负责与脉冲控制器之间的通信 (RS485)。单板机通过 AMS 总线可以控制或读出各数字 I/O 端口以及模拟 I/O 端口。单板机对采集的数字信号和模拟信号周期性地特性计算和保护监测，得到移相脉冲控制量 U_{E1} 和 U_{E4} ，同时输出模拟量

5.5 交一直传动电力机车的微机控制系统

5.5.1 微机控制系统的组成及功能

电力机车控制由传统的模拟控制发展到微机数字控制，标志着电力机车控制水平上升到新的台阶。微机控制系统的特点是：通用性、灵活性、重现性、可靠性和智能性，它的硬件采用模块化设计，为交一直传动电力机车通用；它依靠灵活可变的软件来满足各种机车不同的控制要求；数字控制本身不受环境温度影响，各参数的控制值和保护值在各种环境条件下分散性较小，重复试验时重现性较好，因而控制性能稳定；由于元器件集成度高，且大量工作由软件实现，因而系统可靠性大为提高；微机本身具有记忆功能，可以储存大量信息，可进行自检、故障记忆和检索、故障监控及故障诊断等工作。

5.5.1.1 系统模块

微机控制系统模块如图 2.3-143 所示。各种模拟量由传

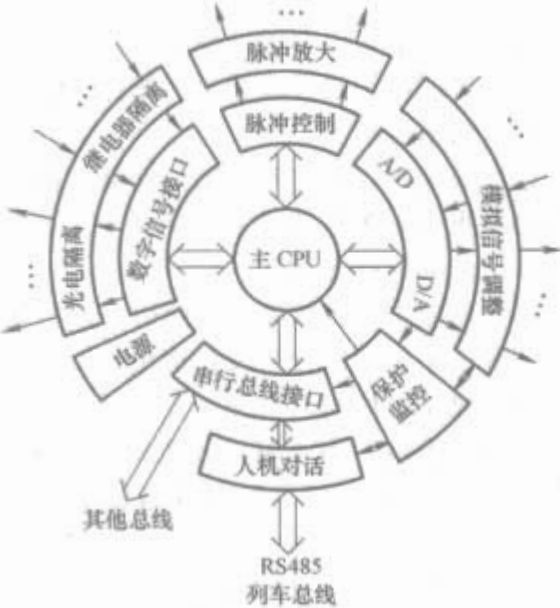


图 2.3-143 微机控制系统模块

(如速度信号)以及中间控制变量和数字量(如空转、过电流、分合主断路器等)。

(3) 信息记忆传送插件。它挂在 AMS 总线上, CPU 为 8031。它一方面与显示器按 RS485 通信传送显示器所需的数据, 同时接收司机的指令; 另一方面 SBC 板可通过 AMS 总线读写该插件上的 DRAM (双口 RAM), 读出司机的指令及写入显示器所需的各种参数。

(4) 模拟 I/O 插件。它有 16 路 A/D 输入和 8 路 D/A 输出, 电压范围为双极性 0~10V, A/D 和 D/A 芯片都是 12 位, 具有比较高的精度。它利用 SBC 提供在总线上的 10MHz 时钟, 构成内循环计算逻辑来控制 A/D、D/A 各通道的转换时序及地址管理。各通道的转换工作按固有的内部周期循环进行, 而不需要主 CPU 的干预。SBC 只要按读写存储器的方式来读取数据 (对 A/D) 或写数据 (对 D/A), 这样占用主 CPU 的时间极少。A/D 和 D/A 一次转换的周期为 51.2μs, 完成一次 16 路 A/D 和 8 路 D/A 变换的周期为 1.228ms。

16 路 A/D 中有两路可通过跨接套接到 D/A 的输出, 用于插件自检。

D/A 输出有 8 个数据区, 每个数据区占 16 字节。正常使用中只使用第一数据区, 其他数据区用于软件调试中中间变量的检测。

(5) 数字 I/O 插件。每个插件箱有 2 个数字量输入插件。它们除了跨接线不同外, 基本电路和器件是相同的; 但由于跨接线不同, 这 2 块插件不能互换, 以 A 和 B 区分之, 它们有不同的防插错编码。

该插件有 16 路 110V 光电隔离的数字输入通道; 8 路继电器隔离的数字输出通道; 16 路灯显示用于显示各种控制信息; 8 路无隔离的数字输入通道, 用于插件箱内部各插件间的连接; 此外还有 4 路中断控制。

数字量输入/输出插件挂在 AMS 总线上, 单板机插件上的主 CPU80186 可通过总线以存储器的访问方式来读写该插件, 读为读取各通道或指示灯的状态, 写为控制各通道或指示灯的状态。

(6) 信号调整 1 插件。它的主要功能是对司机给定值, 牵引变压器二次侧电流, 牵引电动机的电枢电压、电枢电流和励磁电流以及制动空气压力等模拟信号进行调整, 使这些信号的输出电压在 ±10V 以内, 以适合 A/D 变换的要求。

上述信号来源于各种传感器或电位器, 有的是电压型信号, 有的是电流型信号, 且幅值量级不同, 经该插件调整后都变成范围一定的电压型信号。选择这些信号的输出比例是一项重要的工作, 其原则有两个: 一是最大或最小值与 ±10V 间留有一定余量, 因为 A/D 转换在极值附近不一定呈线性; 二是经常使用在 ±5V 左右, 因为中间值附近 A/D 的线性度最好。

司机给定输入范围为 0~15V, 经过信号调整成 0~7.5V。司机给定可有 4 路输入; 即 I 端及 II 端的主司机控制器和辅助司机控制器, 4 路中同时只能有 1 路有输出, 因为它们都是由换向手柄操作后才有输出。取 4 路的大值输出供 A/D 采样。硬件调整成 0~7.5V 对各车是相同的, 各种

车型级位的不同则在软件中考虑。

在牵引变压器二次侧 4 个牵引绕组上都装有交流传感器, 用于检测桥过电流, 对交流短路进行保护。

牵引电动机信号共有 7 路调整电路, 其中 4 路到仪表输出是取绝对值的, 其余 3 路到仪表是单极性的。

(7) 信号调整 2 插件。提供频率/电压转换电路, 把来自速度传感器的脉冲转换成与之成比例的电压信号; 它还为脉冲控制器提供桥释放信号和同步电压信号, 提供用于晶闸管触发的脉冲序列以及过电压保护电路。信号调整 2 按半磨耗轮径 ($D=1.2\text{m}$) 调整, 对应于 100km/h 速度输出为 5V。对于不同轮径在采样后由软件处理。桥释放信号一般调整在 40V 左右, 尽量使晶闸管在第一个触发脉冲期间导通。

(8) 脉冲放大插件。它将来自信号调整 2 的脉冲序列 (幅值 5V, 23.5kHz) 放大, 输出幅值为 48V 的脉冲, 一块脉冲放大插件最多可有 16 路脉冲输出。正常时各插件箱由板位 33 的脉冲放大插件提供触发脉冲; 在一个插件箱故障时, 通过手动转换微机柜面板上的万能转换开关, 改由完好的那个插件箱对全车集中控制, 另一转向架采用跟随控制, 即由完好的转向架 29 板位上的脉冲放大插件提供相同的移相触发脉冲, 从而在硬件增加不多的情况下基本上保留了原有的牵引/制动功能。

(9) 转换控制插件。它由具有 2 动合 2 动断触点的多个继电器组成, 正常时继电器线圈无电; 当一个转向架故障时, 该插件从另一插件箱 (完好的) 获取电源, 实现各路脉冲和电源的转换。

(10) 脉冲控制器插件。CPU 为 80196。它的主要功能: 一是与单板机 SBC 插件进行通信, 交换所需的信息; 二是根据 SBC 发来的 U_{E1} 和 U_{E4} 适时地给各段桥发出触发指令。由 SBC 向脉冲控制器发送的主要信息是 U_{E1} 、 U_{E4} 以及牵引、制动、复位和自检等命令; 由脉冲控制器向 SBC 传送的信息是半波时间、网压积分终值 U_F 及一些数字信息。通信由主机 SBC 发起, 通信周期为 20ms, 信号速率为 15625bit/s。脉冲控制器根据上半波的网压积分终值 U_F 、 U_{E1} 和 U_{E4} , 按预定逻辑计算各段桥的触发点, 在本半波网压积分达到触发点时适时发出触发脉冲。采用这种方法可以弥补网压波动的影响。

除了以上插件外, 有些车上装功率因数补偿接口和功率因数补偿控制插件, 专用于功率因数补偿装置的投切控制; 有的车上装有调制解调插件, 它将司机给定调制成定频、脉冲宽度可变的脉冲, 送往其他车辆, 再经解调把宽度可变的脉冲还原成司机给定的电压, 以防止传输中的电压损失。

微机控制系统实现机车的牵引、电制动控制、空电联合制动控制、轴重转移补偿控制、防空转/滑行控制、机车的各种保护和各种特殊控制要求。特殊控制如 SS₈ 机车上的自动过分相区; 与速度分级控制系统配合, 实现动力制动优先和 2 级常用空气制动; 动车组中的首尾动力车的重联控制或多牵引单元的重联控制。

5.5.2 各型电力机车微机控制系统的主要技术参数

各型电力机车微机控制系统主要技术参数见表 2.3-63。

表 2.3-63 各型机车微机控制系统主要技术参数

所属车型	SS ₈	SS ₉	SS _{4B}	SS _{4B} 重联车
牵引特性	$\left\{ \begin{array}{l} 120n^{(2)} \\ 875n^{(2)} - 87.5v^{(1)} \\ 1360 \end{array} \right\} \text{min}$ $n^{(2)}=0\sim18$	$\left\{ \begin{array}{l} 110n^{(2)} \\ 880n^{(2)} - 88v^{(1)} \\ 1350 \end{array} \right\} \text{min}$ $n^{(2)}=0\sim18$	$\left\{ \begin{array}{l} 150n^{(2)} \\ 600n^{(2)} - 54v^{(1)} \\ 11096 \end{array} \right\} \text{min}$ $n^{(2)}=0\sim10$	$\left\{ \begin{array}{l} 92n^{(2)} \\ 450n^{(2)} - 45v^{(1)} \\ 750 \end{array} \right\} \text{min}$ $n^{(2)}=0\sim10$

续表

所属车型	SS ₈	SS ₉	SS _{4B}	SS _{3B} 重联车
制动特性	$\left\{ \begin{array}{l} 87.5v^{①} - 875n^{②} \\ 910 \end{array} \right\}_{\max}$ $n^{②}=18\sim 1$ 第 9 级最小制动电流 70A, 加馈电阻制动	$\left\{ \begin{array}{l} 88v^{①} - 880n^{②} \\ 870 \end{array} \right\}_{\max}$ $n^{②}=18\sim 1$ 第 9 级最小制动电流 70A, 加馈电阻制动	$\left\{ \begin{array}{l} 56v^{①} - 560 + 50n^{②} \\ 775 \end{array} \right\}_{\max}$ $n^{②}=10\sim 1$ 最小制动电流 70A, 加馈电阻制动	$\left\{ \begin{array}{l} 45v^{①} - 450n^{②} \\ 420 \end{array} \right\}_{\max}$ $n^{②}=0\sim 1$ 第 5 级最小制动电流 70A, 加馈电阻制动
牵引过电流 (A)	1700	1520	1300	800
制动过电流 (A)	1350	1150	1000	450
励磁过电流 (A)	1350	1130	1200	750
电枢过电压 (V)	1150	1185	1134	1700
桥过电流 (A)	3300	4400	3000	3000
过电压保护 (kV)	29	29	29	29
欠电压保护 (kV)	17.5	17.5	17.5	17.5
最深削磁系数	0.45	0.49	0.45	0.45

所属车型	TM ₁	“春城号”电动车组	DDJ ₁ 动力车	SS _{TD} 、SS _{TE}
牵引特性	$\left\{ \begin{array}{l} 120n^{②} \\ 875n^{②} - 87.5v^{①} \\ 1280 \end{array} \right\}_{\min}$ $n=0\sim 15$	$\left\{ \begin{array}{l} 140n^{②} \\ 840n^{②} - 84v^{①} \\ 700 \end{array} \right\}_{\min}$ $n=0\sim 11$	$\left\{ \begin{array}{l} 99n^{②} \\ 99n^{②} (10n^{②} - v^{①}) \\ 1410 \end{array} \right\}_{\min}$ $n=0\sim 2$	$\left\{ \begin{array}{l} 100n^{②} \\ 900n^{②} - 90v^{①} \\ 1320 \end{array} \right\}_{\min}$ $n=0\sim 18$
制动特性	$\left\{ \begin{array}{l} 87.5v^{①} - 875n^{②} \\ 860 \end{array} \right\}_{\max}$ $n^{②}=15\sim 1$ 第 7 级最小制动电流 70A, 加馈电阻制动	$\left\{ \begin{array}{l} 84v^{①} - 840n^{②} \\ 610 \end{array} \right\}_{\max}$ $n^{②}=11\sim 1$ 电阻制动	$\left\{ \begin{array}{l} 95 (v^{①} - 10n^{②}) \\ 950 \end{array} \right\}_{\max}$ $n^{②}=22\sim 1$ 第 11 级最小制动电流 70A, 加馈电阻制动	$\left\{ \begin{array}{l} 90v^{①} - 900n^{②} \\ 760 \end{array} \right\}_{\max}$ $n^{②}=0\sim 1$ 第 9 级最小制动电流 70A, 加馈电阻制动
牵引过电流 (A)	1600	900	1700	1600
制动过电流 (A)	1300	900	1050	1200
励磁过电流 (A)	1100	900	1150	360
电枢过电压 (V)	1150	560	1280	1150
桥过电流 (A)	3300	1800	3300	4500
过电压保护 (kV)	29	26	29	29
欠电压保护 (kV)	17.5	17.5	17.5	17.5
最深削磁系数	0.48	不削磁	0.44	0.50

① v —机车速度。
② n —机车牵引/制动手柄级位。

5.5.3 逻辑控制单元

逻辑控制单元（简称 LCU）利用现代电力电子技术和微计算机技术构成无触点控制电路，取代机车上原有的时间继电器、中间继电器等低压电器和大量的迂回电路，具有控制方式灵活、编程方便、布线直观、检修条理清晰等特点，同时采用无触点输出控制方式，解决了原有系统在强振环境下工作的不可靠问题。

LCU 采用双路冗余设计，并配置手动万能转换开关，当一路出现故障时，可人工切换至另一路工作，从而提高了控制系统工作的可靠性。

机车上使用的 LCU 必须符合 TB/T 3021—2001《铁道机车车辆电子装置》的要求，包括使用环境冲击振动、电源波动以及 EMC 的各项要求，这是一般工业用 PLC 不能满足的。此外，机车上的输入信号大都是 DC 110V，而一般工业用 PLC 输入为 DC 24V 或 AC 220V；机车上的输出为 DC 110V 且输出负载比较大，这也是工业用的 PLC 难于满足的。因此机车上的 LCU 不能直接采用工业 PLC，必须专门进行设计。

现在机车上使用的 LCU 基本上由两家生产：长沙杰瑞（Ⅰ型）和深圳通业（Ⅱ型）。两家的硬件结构和软件均不相同，但在同一型号机车上两家产品对外接口（即输入和输

出）是相同的，下面分别介绍：

5.5.3.1 Ⅰ型 LCU

（1）主要技术参数。Ⅰ型 LCU 主要技术参数见表 2.3-64。

表 2.3-64 Ⅰ型 LCU 主要技术参数	
参 数	指 标
输入电压 (V)	77~137.5 (标称 110)
瞬间最大负载电流 (A)	8
持续电流 (A)	1.2, 3
驱动方式	隔离放大驱动
输入点数	最大 126 路
输出点数	最大 81 路

（2）硬件构成。LCU 除电源插件外，还有 CPU 插件、输入插件和输出插件。

1) 电源插件与微机柜中使用的电源插件相同，输入为 DC 110V，输出为±24V、±15V、+5V。

2) CPU 插件完成输入点状态的采集、逻辑运算、输出点状态的确定以及串行通信（RS485）。该插件采用了双机冗余设计，一台单片微机处于在线工作状态，而另一台处于

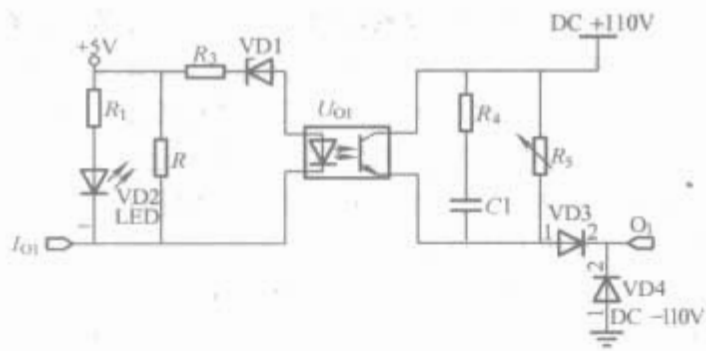


图 2.3-151 输出电路原理图

块控制插件构成。每块控制插件上都有中央处理单元，有

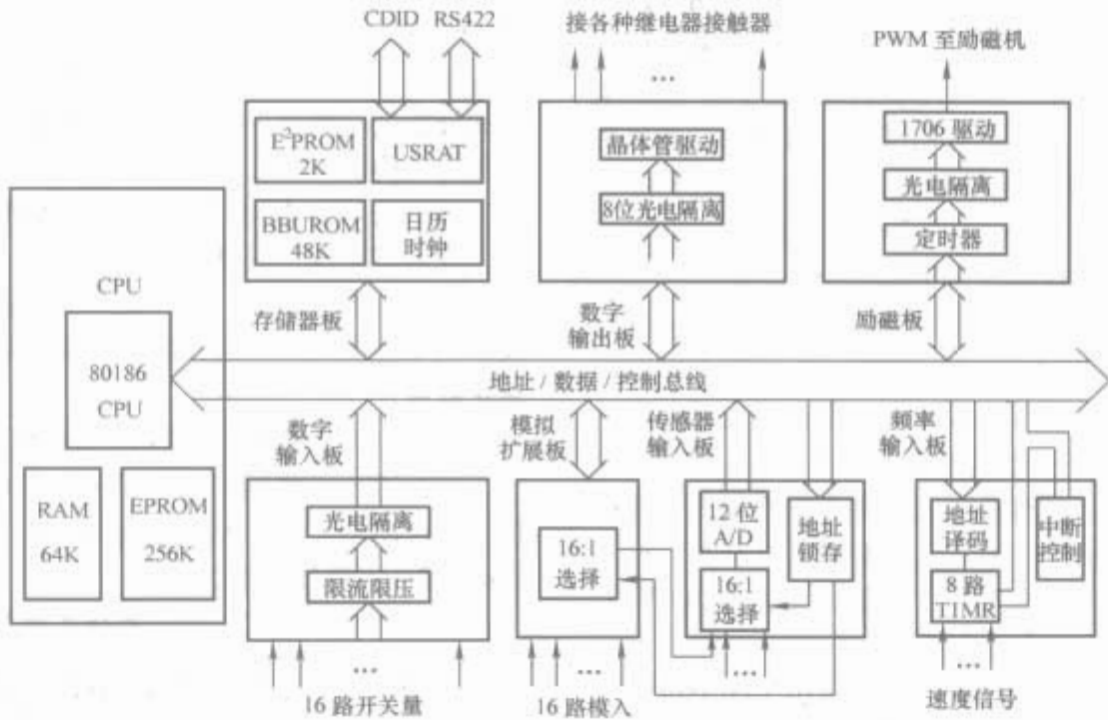


图 2.3-152 微机系统工作原理框图

5.6.1.1 电气参数

内燃机车微机控制系统主要电气参数见表 2.3-66。

参 数	指 标
数字量信号	0~40V 为逻辑“0” 58~110V 为逻辑“1”
模拟量信号	高压通道为 0~110V 低压通道为 0~10V
频率量信号	10~10000Hz 正弦波， 允许峰值为 216.8V/10000Hz
信号变换	7 路信号与 LEM 电流传感器 1000A/200mA 配用，特性是 204.8mA/5V
辅机电压保护值 (V)	125±5
机内电源参数	5×(1±0.5%)V 5A ±15×(1±1.5%)V 2.2A ±24×(1+5%~1+10%)V 6A
供电电源	DC 110×(1+5%~1+15%)V 3A

5.6.1.2 各插件的功能

下面以 DF_{8B} 内燃机车为例介绍各插件的功能。

(1) 数字输出插件。共 8 个通道，110V 驱动，控制机车相应继电器动作。输出信号为微机报警指示灯驱动，牵引电动机磁场削弱驱动，柴油机停机驱动，撒砂电空阀驱动，空转撒砂指示灯驱动，二级电阻制动驱动，微机励磁驱动，辅机过电压保护驱动。

24 点输入和 18 点输出。一组系统有 5 块控制插件组成。由于各块控制插件的软件实现的功能不同，因而同组之间的 5 块控制插件不能互换；而两组之间对应的控制插件可以互换。电源通信插件能够独立地提供两套电源和内部 CAN 通信。

5.6 电传动内燃机车的微机控制系统

5.6.1 16 位微机控制系统的组成及功能

内燃机车 16 位微机控制系统由 1 台微机柜（含控制软件）、2 台彩色液晶显示屏和 37 台各类传感器等硬件组成，其工作原理框图如图 2.3-152 所示。

(2) 励磁控制插件。用于控制励磁机励磁电流的斩波器输出，从而控制励磁机的励磁电流。

(3) 数字输入插件 A。16 通道开关量输入。输入信号有牵引工况信号，制动工况信号，自负载工况信号，“0”挡位信号，“LC”励磁接触器线圈得电信号，“XC”电机磁场削弱接触器线圈得电信号，1~6 号牵引电动机切除信号，柴油机工作信号。

(4) 数字输入插件 B。输入信号有曲轴箱超压信号。

(5) 传感器输入插件 A。输入信号有热交换器出口水温度、柴油机中冷水系统出口温度、柴油机中冷水系统进口温度、柴油机高温水系统出口温度、柴油机高温水系统进口温度、燃油系统末端压力、燃油泵出口压力、前增压器机油进口压力、后增压器机油进口压力及机油滤清器进口压力。

(6) 模拟扩展 I/O 插件。输入信号有 +24V 电源、功调电阻 (LCP) 滑动端电压、功调电阻 (LCP) 高端电压、-24V 电源电压、牵引时励磁机电压、牵引电动机磁场电流、1~6 号牵引电动机电枢电流及主发电机电压。

(7) 传感器输入插件 B。输入信号有柴油机机油进口温度、柴油机机油出口温度、接地漏电流、柴油机机油进口压力、励磁机磁场电流、主发电机磁场电流、制动时励磁机输出电压及柴油机机油出口压力。

(8) 频率输入插件 A。输入信号有 1、2 号冷却风扇转速（每转 60 个脉冲，最大 1300Hz），柴油机转速（每转 25 个脉冲，最大 466.7Hz），前、后增压器转速（每转 2 个脉冲，最大 833.3Hz）。

(9) 频率输入插件 B。输入信号有 1~6 号牵引电动机

转速（每转 68 个脉冲，最大 2833Hz）。

(10) CPU 插件。主 CPU 为 Intel 80C186，时钟 8MHz，256KB ROM 区，64KB RAM 数据区。

(11) 存储器/串行 I/O 插件。48KB 带后备电池 RAM，两路 RS422C 串行输入/输出，2KB E²PROM。

5.6.1.3 控制功能

主要有恒功特性控制功能，电阻制动控制功能，防空转/滑行保护、故障诊断及保护功能，向显示屏传送数据的功能。软件固化在 CPU 插件中的 4 片 ROM 中。

(1) 恒功特性控制。柴油机发出的总功率与柴油机的转速有关，它减去机车辅助功率消耗后得到柴油机不同转速下恒功励磁控制的功率输出。微机系统接受由功调电阻滑臂提供的电压信号，当滑臂停留在最大增载极端位置时，功率基准为恒功励磁控制输出；随着滑臂向减载方向移动，功率基准线降低；当滑臂停留在减载极端位置时，功率基准降至 80%。当柴油机转速在 640r/min 以下时，功调电阻不起负载调节作用，微机控制只维持主发电机恒功。

当手柄位置升降时，为保持牵引功率的平滑控制，微机对功率加载和减载速率按预定值进行控制。为使牵引电动机转矩平滑地增大（尤其当机车起动时），微机预先规定了单台电动机电流最大上升速度不得超过 200A/s，电流上升率还受到加载速率的限制；同样微机还规定了电流最大下降速率为 250A/s，电流下降速率也受到减载速率的限制。对主发电机电压上升率规定为 150V/s，下降率规定为 300V/s，当然，这也受加载和减载速率的限制。

为满足机车恒功速度范围的要求，在牵引工况下进行一级磁场削弱；当牵引电动机转速小于或等于 1131r/min（相当于机车速度 48km/h）时，切除磁场削弱。

(2) 电阻制动特性的控制。机车施行电阻制动时，微机系统使牵引电动机电枢电流和磁场电流的最大值限制在预定的极限上。牵引电动机磁场电流加载率为 50A/s。

当牵引电动机转速超过 1768r/min（相当于机车速度 75km/h）时，牵引电动机电枢电流从最大值开始呈线性减少，直至电动机转速为 2385r/min（允许的最大电动机转速）时的电流值。

机车实行二级电阻制动。当牵引电动机转速超过 707 r/min（相当于机车速度为 30km/h）时，切除二级电阻制动；当牵引电动机转速低于 509r/min（相当于机车速度为 25km/h）时，投入二级电阻制动。

5.6.1.4 主要保护功能

(1) 主发电机过电流、过电压保护。主发电机过电流保护为 7500A；主发电机过电压保护为 1100V。

(2) 主发电机磁场过电流保护为 380A。

(3) 牵引电动机过电流保护为 1500A。

(4) 制动电阻过电流保护为 740A。

(5) 牵引电动机磁场过电流保护为 840A。

(6) 主电路接地漏电流保护为 950mA 或 30min 内连续大于 500mA。

(7) 柴油机机油压力低保护：柴油机转速大于 390 r/min 时，60kPa 持续 5s；柴油机转速大于 720r/min 时，180kPa 持续 5s。

(8) 柴油机机油、水温度高保护为高于 88℃。

(9) 柴油机曲轴箱超压保护为 588Pa。

(10) 柴油机超速保护为 1130r/min。

(11) 柴油机燃油压力低保护为 150kPa。

5.6.2 32 位微机网络控制系统的技术特点、组成及功能

LCS32 微机控制系统是为内燃机车（动车组）开发的新一代 32 位（主 CPU 为 MC68332）微机控制系统，具有很强的模块化结构及控制功能，适合于联网运行，是国内现有内燃机车微机控制系统的功能扩充和升级换代产品。

5.6.2.1 系统技术特点及优势

(1) 系统处理能力增强，机车整体性能提高。由于该系统采用了 32 位微机处理器，大大提高了控制系统的运行速度和处理能力，因此，增强了机车控制系统的实时响应及实时处理能力，从而可提高机车的整体性能。

(2) 存储空间增加，系统功能增强。32 位微处理器与 16 位系统比较，寻址空间大为增加，因而可大大增加存储器容量，这使机车的故障记录功能大为增强，再配上合适的地面分析处理软件，可提高机车故障的分析、判断、处理以及预防功能。

(3) 采用 SMT 技术和新型元器件设计，缩小了硬件体积，降低了功耗，提高了可靠性。

(4) 应用了 VRTXRTOS（实时多任务操作系统），提高了机车控制软件的设计质量和实时处理性能，扩大软件模块化程度。

(5) 应用了软件下载技术，方便软件的调试及现场下载。

(6) 适合于联网运行，具有 MVB 接口和 Lonworks 接口，既可用于 T 型网络，也可用于 L 型网络。

5.6.2.2 主要技术参数

LCS32 微机控制系统主要技术参数见表 2.3-67。

表 2.3-67 LCS32 微机控制系统主要技术参数	
参 数	指 标
主 CPU	MC68332 时钟 16MHz
RAM (KB)	512
故障记录区 (MB)	≤2
程序存储器 (MB)	1
频率采集范围 (Hz)	0.5~10k
模拟信号采样精度 (位)	12
模拟信号电压范围 (V)	0~+10
开关量输入电平 (V)	≥50 高电平 ≤30 低电平
开关量输出驱动电流 (A)	2
励磁斩波驱动电流 (A)	8
MVB 数据传输速率 (Mbit/s)	1.5
Lonworks 数据传输速率 (kbit/s)	78
串行通信口数据传输速率 (kbit/s)	≤38.4

5.6.2.3 系统组成

该系统采用模块化设计方法，目前暂配有下列几种标准插件模块，在构成实际应用系统时这些模块可以任意组合。所有 I/O 模块均通过系统总线连至 CPU 插件。根据功能需要可配置不同数量的 I/O 模块，硬件组成见图 2.3-153。微机装置对外通信可采取 MVB、Lonworks 总线或 RS485 (RS422、RS232) 异步串行通信等方式，其中 MVB 介质可以为光纤或 ESD+ 双绞屏蔽线。

(1) CPU 插件。它是系统核心，主要由以下电路构成：MC68332 及其外围电路，控制逻辑电路，RAM、Flash 存储器，带电池 RAM，时钟电路，硬件看门狗，串行通信控制器电路，程序下载电路以及总线接口电路。

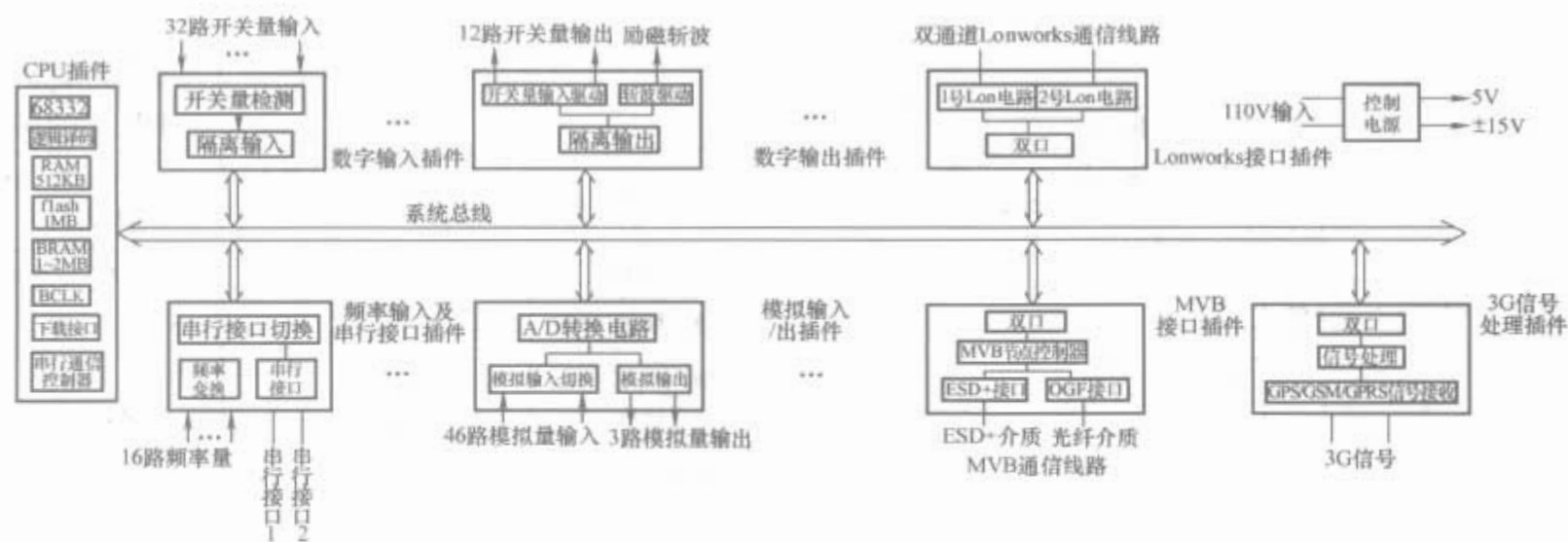


图 2.3-153 32 微机网络控制系统硬件组成示意

(2) 数字输入插件。负责检测机车 110V 开关量信号，主要由 110V 检测、电气隔离、滤波及相关逻辑译码控制和总线接口等电路构成。

(3) 数字输出插件。完成对机车 110V 电器的驱动和励磁电路斩波控制，主要由电气隔离、MOS 管及其驱动电路以及相关逻辑译码控制和总线接口等电路构成。

(4) 频率输入及串行接口插件。完成对频率信号的变换以及串行通信接口驱动，主要由频率信号检测和整形电路、电气隔离以及串行通信接口驱动等电路构成。该系统配有 RS485/RS422/RS232 串行接口。

(5) 模拟输入/输出插件。负责完成对机车电流、电压等模拟信号的采样或产生相关模拟量输出信号，主要由模拟信号输入、滤波、多路切换、A/D 转换、模拟量输出以及相关逻辑译码控制和总线接口等电路构成。

(6) Lonworks 接口插件。负责微机系统对外的 Lonworks 总线通信，主要由 Lonworks 总线控制器、总线收发器、双口 RAM 等电路构成，该插件有双路 Lonworks 总线通道。

(7) MVB 接口插件。负责微机系统对外的 MVB 通信，主要由 MVB 控制器、双口 RAM 等电路构成，其通信介质有光纤 (OGF) 和 ESD+ (带光隔的电气短距离) 双绞屏蔽线两种。

(8) 3G 信号处理插件。负责对 GPS、GSM/GPRS 信号的接收和处理，主要由 GPS、GSM/GPRS 信号接收电路、信号处理器，双口 RAM 和总线接口等电路构成。

(9) 电源插件。控制电源的输入电压为 110V、输出 5V 和 ±15V 供相关插件和传感器使用。

(10) 机箱。LCS32 系统仍采用目前内燃机车上广泛应用的机箱结构，其特点为：

- 1) 采用全封闭式结构 (除上下面散热孔外)，试验证明它具有良好的 EMC 性能。
- 2) 机箱采用母板总线结构，即所有插件通过母板计算机总线相互连接。
- 3) 插件大小适中，其外形尺寸为 7in×9in (1in=25.4mm)，插件采用 AMP165 芯连接器。
- 4) 机箱对外采用 AMP62 芯连接器与机车线路直接连接。

5.6.2.4 功能

LCS32 微机控制系统有以下主要功能：

- (1) 特性控制功能，包括牵引工况下柴油机恒功率控制、电阻制动特性控制、自负荷工况控制等。
- (2) 交流传动内燃机车中的中间直流环节电压控制。

- (3) 空转/滑行保护功能。
- (4) 机车电气系统及柴油机故障诊断、保护、记录功能。
- (5) 诊断与显示功能。
- (6) DC 110V 辅机励磁控制。
- (7) DC 600V 供电励磁控制。
- (8) 轮缘喷脂控制。
- (9) 柴油机调速控制。
- (10) 机车逻辑控制 (PLC) 功能。
- (11) 列车级和车辆级通信 (WTB、MVB、Lonworks 总线) 功能。
- (12) 3G 技术应用。

目前，可用 GPS 测出机车所处海拔、地理位置等信息，用于修正机车高原功率及结合 GIS 技术进行机车运行轨迹跟踪等；用 GPRS 无线通信技术完成机车运行参数的地面监视及一些控制参数的地面设置等功能。

5.7 控制电源及辅助电源

5.7.1 DC 110V 控制电源

机车上的 110V 控制电源系统由 110V 控制电源和蓄电池构成，通常情况下二者并联运行，为机车提供稳定的 110V 控制电源。在降弓情况下，由蓄电池供给低压试验和照明电源；运行中 110V 控制电源发生故障时，蓄电池作维持机车故障运行的控制电源。

110V 电源具有恒压、限流的特点，输出电压稳定在 110V (±5%)，输出电流即使在短路情况下也被限制在 55A (±10%) (此时不再稳压)。110V 控制电源的主要参数见表 2.3-68。

表 2.3-68 DC 110V 控制电源的主要参数

参 数		指 标
输入电源	电压 (V)	389 (±10%) 单相交流
	频率 (Hz)	50
输出额定电压 (V)		DC 110×(1±5%) (与蓄电池并联运行)
限流保护整定值 (A)		55×(1±10%)
静态电压脉动有效值 (V)		<5 (与蓄电池并联运行)

目前机车上用的 DC 110V 控制电源主要有两种：一种是采用晶闸管半控桥工频整流电路；另一种是采用以 IPM 为开关器件的高频 DC-DC 变换电路。前者体积和质量均比后者大但价格相对较低。前者用于 SS₇ 系列以外的国产电力机车上，后者用于 SS_{7D}、SS_{7E} 电力机车上。

图 2.3-154 所示为工频整流的 110V 电源控制框图，图 2.3-155 所示为 110V 电源外特性。

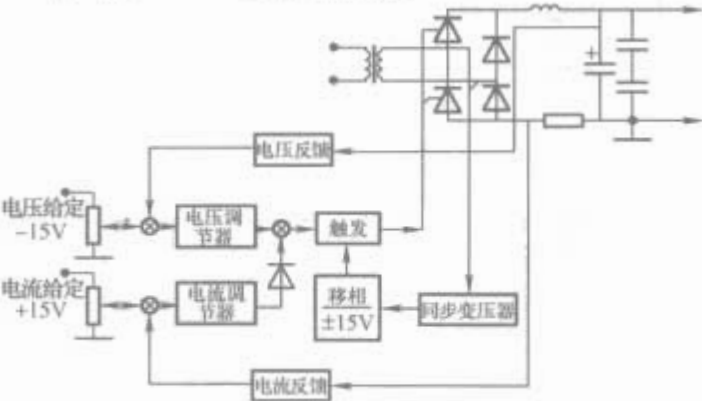


图 2.3-154 110V 电源控制框图

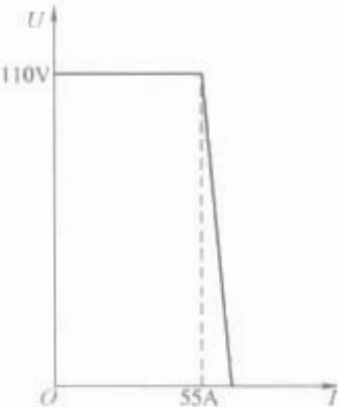


图 2.3-155 110V 电源外特性

IPM 高频开关电源模块由输入输出滤波器、限流充电电路、整流电路、中间支撑电路、高频逆变电路、高频整流电路和控制保护插件等组成，其电路原理和控制原理如图 2.3-156 和图 2.3-157 所示。该电源模块采用智能功率模块（IPM）的半控桥式变流电路，工作频率为 20kHz，并且在电路的输入输出端均加装了合适的 EMI 电源滤波器，从而比较好地解决了电磁兼容的问题，与传统的机车 110V 相控稳压电源相比，该模块具有质量和体积小、响应快、稳压精度高、输出电压纹波低、效率高等显著优点，具体见表 2.3-69，但价格较贵。

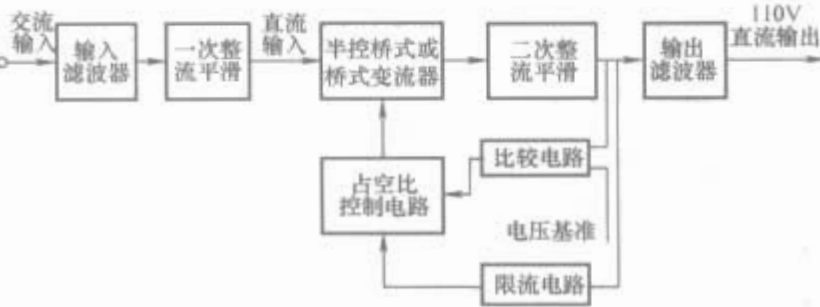


图 2.3-156 电路原理示意



图 2.3-157 控制原理图

表 2.3-69 TPD17A 控制电源柜与传统相控电源柜的性能比较

项 目	TPD17A 控制电源柜	传统电力机车用 110V 控制电源柜
电路形式	以 IPM 为开关器件的高频 DC-DC 变流电路	传统的晶闸管半控桥

续表

项 目	TPD17A 控制电源柜	传统电力机车用 110V 控制电源柜
变压器类型	高频变压器（体积小、质量小）	工频变压器（体积和质量均大）
输出滤波器	高频 LC 变压器	传统的 LC 滤波器
稳压精度（%）	≤1.5	≤5
输出纹波电压脉动有效值（V）（与蓄电池并联）	≤2	≤5
整机效率（%）	≥90	≥70
动态调节时间（s）	<0.01	<0.2
控制方式	PWM 调制	相控

注 其余性能指标均满足 TB/T 1395—2003《直流 110V 机车控制电源柜技术条件》中的要求。

5.7.2 48、24、15V 辅助控制电源

辅助控制电源的简单工作原理是电源输入为直流 110V 电压，经斩波整流，分别产生 15、24、48V 直流电压。辅助控制电源采用脉宽调制（PWM）开关电源技术，工作频率达 100kHz，并设有输入、输出过电流及输出过电压保护功能，因而具有体积小、质量小、工作可靠、效率高等特点。其主要技术参数见表 2.3-70。

表 2.3-70 辅助控制电源主要技术参数

参 数		指 标
输入（V）		DC 110(±10%)
输出	电压（V）	15 24 48
	电流（A）	3 3 3
	效率（%）	>70

在 SS_{7D} 和 SS_{7E} 机车上，在 TPD17A 电源柜中 DC 24V、DC 15V 辅助电源采用市场上可以购买的模块，共有两套该辅助电源模块，一套工作，另一套冷备，参数如下：

输入电压：DC 77~137.5V；

输出 电 压/电 流：DC 24V（±2V）/3A；DC 15V（±0.5V）/3A。

6 牵引电器

6.1 高压电器

电力机车高压电器指的是机车主电路中牵引变压器一次侧的机车电器，包括受电弓、主断路器、高压隔离开关、高压接地开关、高压连接器、高压电压互感器、高压电流互感器、高压避雷器和轴端接地装置。

6.1.1 受电弓

受电弓是一种铰接式的机械构件，它通过绝缘子安装于电力机车车顶。受电弓的集电头升起后与接触网导线接触，从接触网上集取电流，并将其通过车顶母线传送到车内供机车使用。

按照驱动方式的不同，受电弓可分为气囊式受电弓和弹簧气缸式受电弓。气囊式受电弓是升弓气囊驱动升弓，自重降弓，而弹簧气缸式受电弓是升弓弹簧驱动升弓，气缸降弓。

6.1.1.1 受电弓技术参数

目前，我国电力机车受电弓主要有 TSG15、DSA200 和

TSG3 三种，其技术参数见表 2.3-71。

表 2.3-71 受电弓技术参数

参 数	TSG15 (8WL0 127-6YH69)	DSA200	TSG3
额定工作电压 (kV)	25	25	25
额定工作电流 (A)	1000	1000	630
运行速度 (km/h)	200	200	160 (带阻尼器)
折叠高度 (mm)	≤678 (包括支持绝缘子)	588 (包括支持绝缘子)	588 (不包括支持绝缘子)
最小工作高度 (从落弓位滑板面起) (mm)	220	300	500
最大工作高度 (从落弓位滑板面起) (mm)	2250	2210	2250
受电弓集电头长度 (mm)	1950±10	1950	2085

续表

参 数	TSG15 (8WL0 127-6YH69)	DSA200	TSG3
滑板长度 (mm)	1250±1	1576	1250
静态接触压力 (N)	70±10, 可调	70±5	70±10
环境工作温度 (℃)	-40~+70	-40~+40	-40~+40
最小工作压力 (kPa)	400	400	520
最大工作压力 (kPa)	1000	1000	1000
升弓时间 (s)	6~10	≤5.4	6~8
降弓时间 (s)	≤6	≤4	5~8
升弓驱动方式	双气囊装置	单气囊装置	弹簧
总重 (kg) (绝缘子除外)	≤110	126	210

6.1.1.2 基本结构

气囊式受电弓又分为单气囊受电弓和双气囊受电弓。双气囊受电弓结构如图 2.3-158 所示。

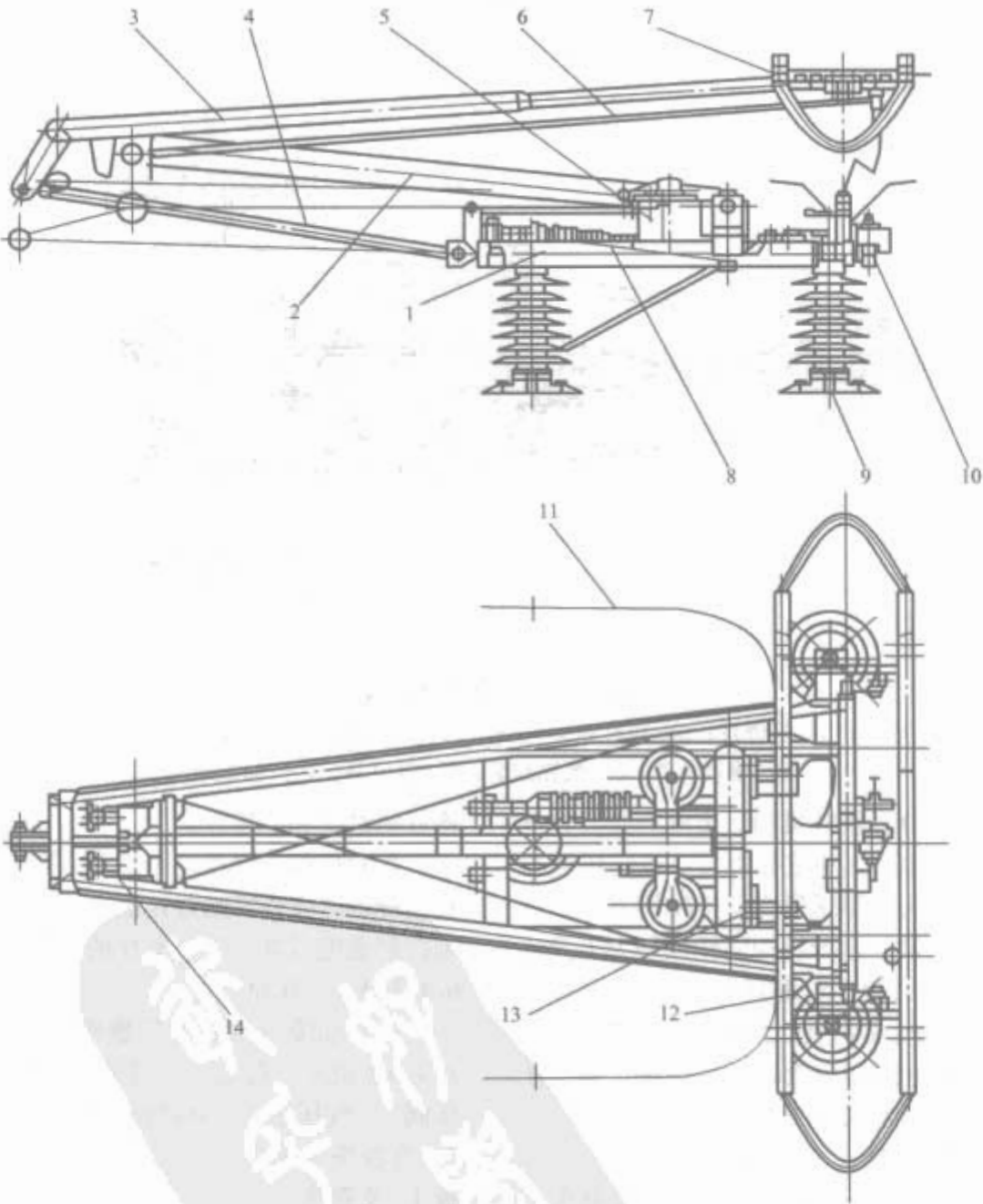


图 2.3-158 双气囊受电弓结构

- 1—底架；2—下臂杆；3—上框架；4—拉杆；5—升弓气囊；6—平衡杆；7—弓头；
8—阻尼器；9—绝缘子；10—气路组装；11—绝缘软管；12—弓头电流连接组装；
13—底架电流连接组装；14—肘接电流连接组装

(1) 底架部分。刚性底架由型材（钢材）组焊而成，它是整个受电弓的基座部分，并通过绝缘子固定在机车车顶上。底架上装有升弓气囊、一套铰链机构和一副受电弓阻尼

器。升弓气囊安装在底架的气囊安装支板上，阻尼器一端安装在底架上，另一端均安装在铰链机构中的下臂杆上。

(2) 铰链机构。铰链机构是实现集电头升降运动的机

构,包括上框架、下臂杆、导杆、集电头导向装置等,它们通过各种铰链座铰接。上框架由压型铝合金管材和板材焊接而成,下臂杆由管材组焊而成,拉杆为铝合金棒材制成的螺纹杆件,集电头导向装置为不锈钢材料。各铰接处都装有滚动轴承并采用金属软编织线进行短接,以防止大电流对轴承产生烧损破坏,平衡杆的作用是保证集电头滑板面在受电弓整个工作高度范围内,始终保持水平状态。

(3) 集电头部分。集电头部分包括弓头悬挂和集电头。集电头是直接和接触导线接触受流的部分,其上装有碳滑板。弓头悬挂垂悬在集电头下方,两个橡胶弹簧元件安装在集电头和上臂间,克服横向偏移,这种结构使滑板在机车运行方向上移动灵活,而且能够吸收该方向上的冲击,达到保

护滑板的目的。
滑板中有气腔,通有压缩空气,如果滑板出现磨损到极限或断裂时,受电弓会迅速自动降下,更换滑板后,自动降弓装置重新启动。

(4) 升弓装置和气路组装。升弓装置传递、实现对受电弓升降运动的控制,升弓装置由气囊组装、蝴蝶座、钢丝绳组装等组成。升弓装置一端安装在底架上,另一端通过钢丝绳与螺栓固定在下臂杆的调整板上。

气路组装是提供压缩气体的管路,一端与升弓装置的气囊连接,另一端与绝缘软管连接,由机车供风断风,从而实现升降弓控制。

单气囊受电弓结构如图 2.3-159 所示。

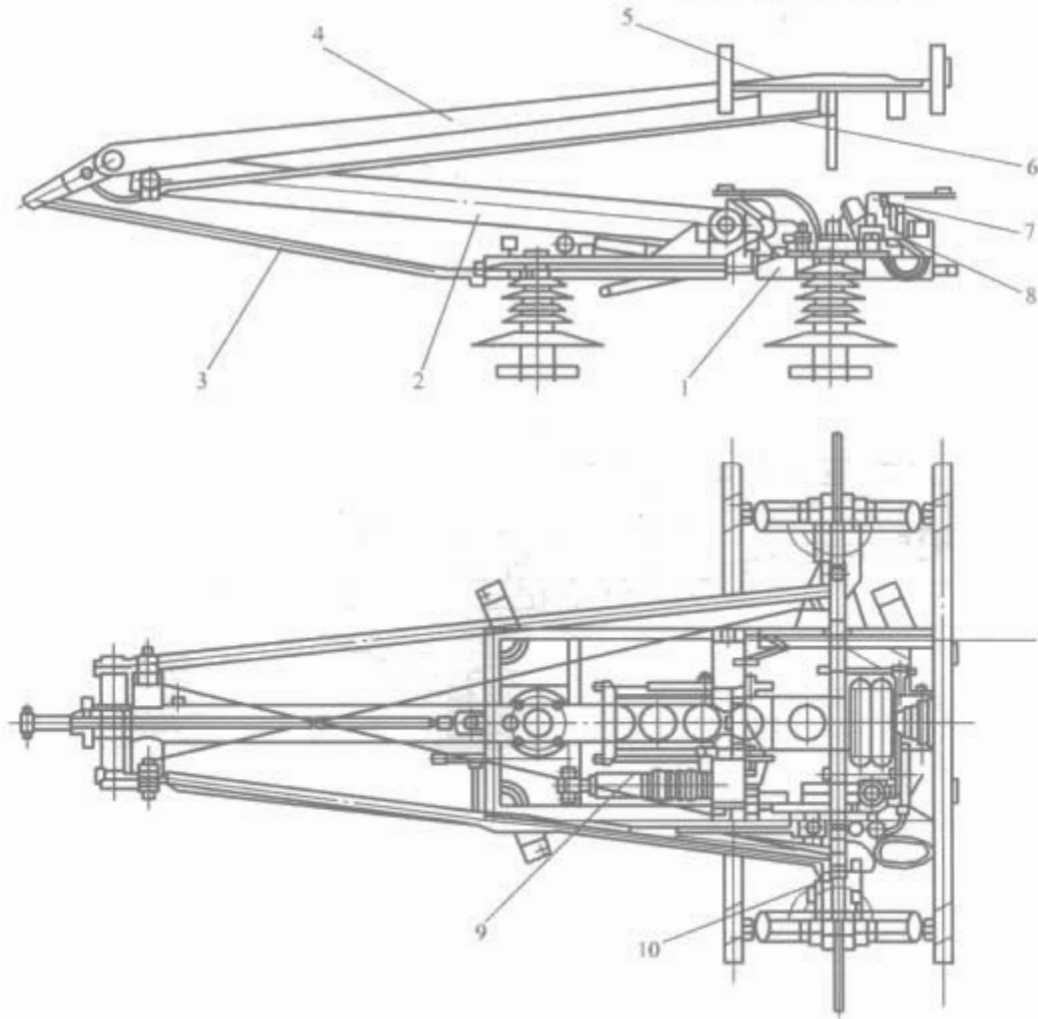


图 2.3-159 单气囊受电弓

1—底架; 2—下臂杆; 3—导杆; 4—上框架; 5—集电头; 6—集电头导向装置;
7—驱动装置; 8—气路组装; 9—阻尼器; 10—编织线

单气囊受电弓由底架部分、铰链机构、集电头部分、升弓装置和气路组装 4 部分组成。其中底架部分、铰链机构与双气囊受电弓类似,而集电头支撑垂悬在 4 个拉簧下方,在集电头和上臂间安装 2 个扭簧。这种机构同样也是为了保证滑板在机车运行方向上移动灵活,实现其平稳受流的目的。单气囊受电弓的升弓装置由气囊组装、矩形管、支架组焊、螺杆、四联体等组成,同样也是以气路组装为提供压缩气体的管路,由机车供风断风,从而实现升降弓控制。

弹簧气缸式受电弓结构如图 2.3-160 所示。

弹簧气缸式受电弓由底架部分、铰链机构、集电头部分、传动机构和控制机构组成,其中底架部分、铰链机构的结构和作用与气囊受电弓类似,集电头部分包括弹簧盒和弓头。弹簧盒部分是用来保证机车运行时,弓头能随着接触网高度的变化而作前后、上下的动作,以便改善受流质量,它使弓头与铰链结构之间呈弹性连接。

传动机构用来传递、实现对受电弓升降运动的控制,它与受电弓本体之间用绝缘子连接,包括受电弓的传动风缸、

连杆绝缘子和连接杆。
控制机构控制受电弓的升、降弓运动,包括电磁控制阀和缓冲阀。缓冲阀通过控制进、出传动风缸的压缩空气流量来控制受电弓升、降弓动作的快慢。

6.1.1.3 工作原理

带自动降弓装置的气囊驱动式受电弓的气路原理如图 2.3-161 所示,包括空气过滤 1、单向调速阀(升弓) 2、调压阀 3、气压表 4、单向调速阀(降弓) 5、稳压阀 6、气囊 7、气控快排阀 8、截止阀 9、试验阀 10、带有气腔的碳滑板 11 及管路。

气囊式受电弓由空气回路进行控制。升弓时电磁阀得电,气路打开,压缩空气通过空气过滤器 1、单向调速阀(升弓) 2、调压阀 3、气压表 4、单向调速阀(降弓) 5、稳压阀 6 进入气囊 7,同时压缩空气通过管路经气控快排阀 8 向具有气腔的受电弓碳滑板 11 供气,电力机车上的接地电势和高压接触网线之间的电势差为 25kV。自动降弓装置的压缩空气输入端与管路间连接一绝缘软管,通过该绝缘软管

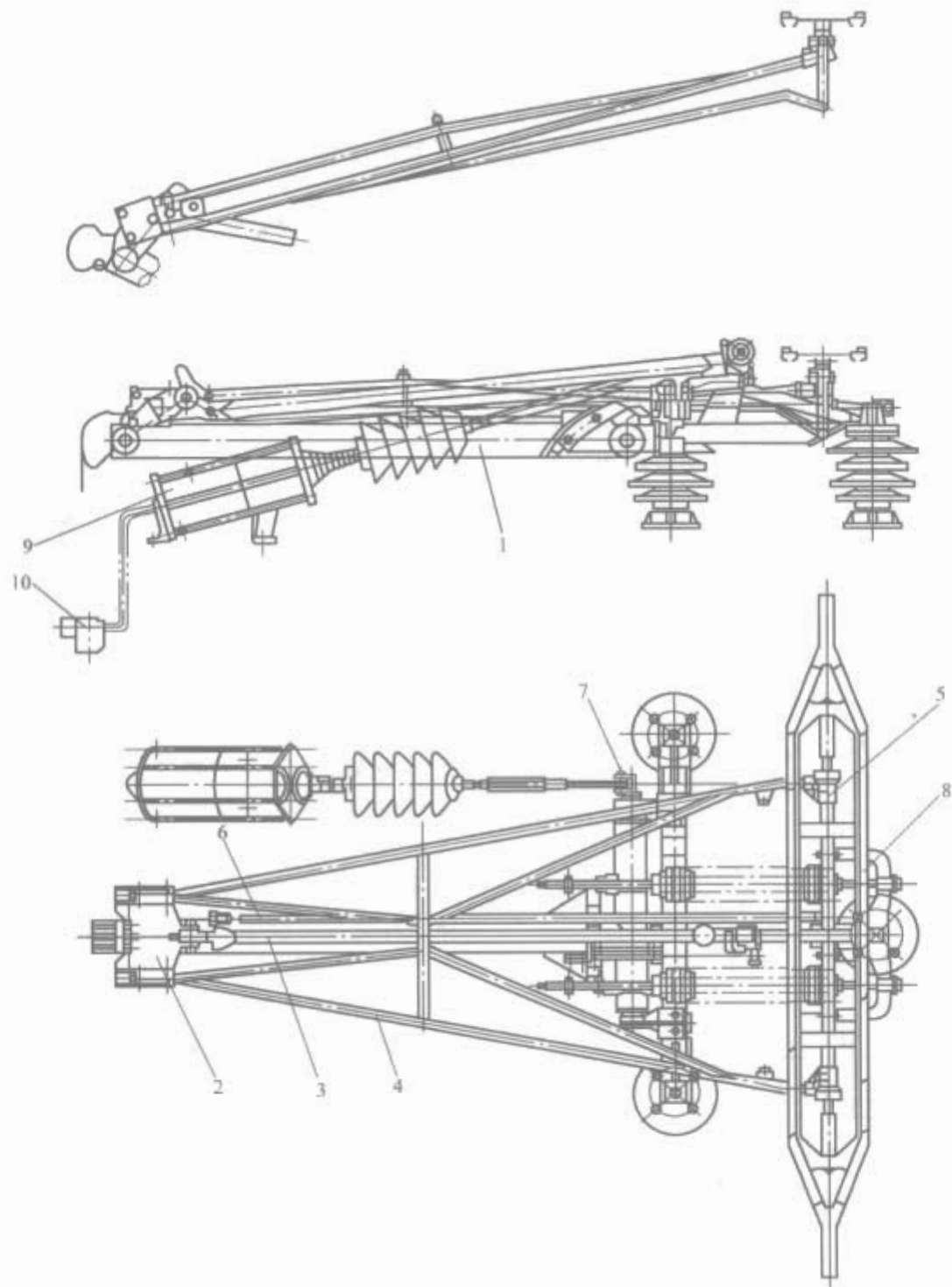


图 2.3-160 弹簧气缸式受电弓

1—下臂杆；2—中间铰链座；3—推杆；4—上框架；5—上转轴；
6—平衡杆；7—转轴；8—集电头；9—传动机构；10—控制机构

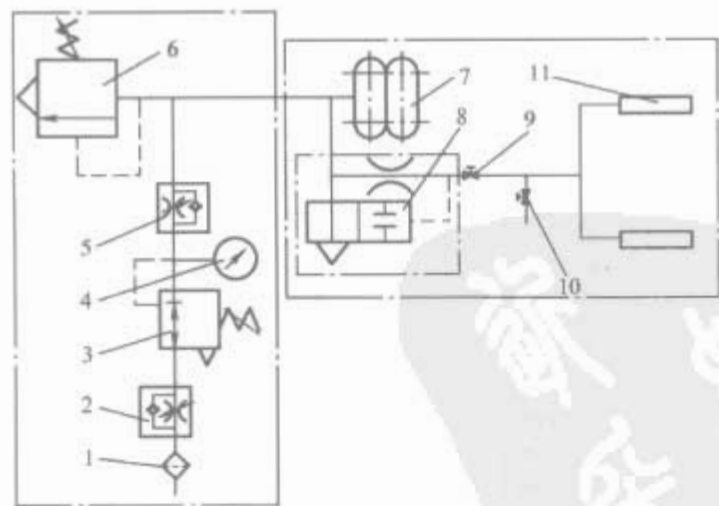


图 2.3-161 气囊式受电弓升弓装置
和气路装置原理图

1—空气过滤器；2—单向调速阀（升弓）；3—调压阀；
4—气压表；5—单向调速阀（降弓）；6—稳压阀；
7—气囊；8—气控快排；9—截止阀；10—试验阀；
11—带有气腔的碳滑板（2块）

的空气须保证其绝缘性能。气控快排阀 8 包括节流阀和两位两通换向阀，该节流阀与两位两通换向阀构成一并联回路。

管路与气囊 7、节流阀及两位两通换向阀相连接，压缩空气经过节流阀到达带有气腔的碳滑板 11，向气囊 7 中充气。其中节流阀与带有气腔的碳滑板之间引出一控制管路连接至两位两通换向阀的控制接口，换向阀的输入口与管路相连接，其排气口与大气连通。压缩空气输入端前端设有一电控排气阀（图中未标出）及空气压力继电器（未标出）。受电弓带有气腔的碳滑板与气控快排阀 8 间的管路上设有截止阀 9 和试验阀 10。

当受电弓集电头抬起时，压缩空气通过管路经换向阀的排气口排放到环境中，与此同时，压缩空气也经过节流阀到达受电弓的集电头，同时向气囊 7 充气；由于系统的密封性好，与换向阀的控制端相连接的控制管路内压力升高，使阀门换向关闭，并保持截止状态，从而由压缩空气管路及气囊中的压缩空气驱动实现升弓。当受电弓正常降弓时，起动装置在压缩空气输入端前端的电控排气阀进行排气，控制管路和压缩空气输入端管路之间产生反向压力差，即控制管路中的压力大于压缩空气输入管路中压力，此时气控快排阀的换向阀不动作，受电弓靠自重落弓。

当由于受电弓滑板破裂、磨损到极限或管路发生泄漏时，控制管路中的压缩空气压力下降，控制管路与压缩空气

输入管路之间产生正向压力差，即控制管路中的压力小于压缩空气输入管路中的压力，不足以使换向阀处于关闭状态，换向阀打开，气囊7及管路中的压缩空气经过换向阀的排气口排放到大气中。同时，带有触点开关的空气压力继电器将动作，通过电器信号通知机车在管路系统中出现压力下降，在受电弓与接触网脱离之前，主断路器可以先切断，从而保证受电弓不会在带电负载的情况下从接触网线脱离。

弹簧气缸式受电弓也由空气回路进行控制。升弓时电磁阀得电，气路打开，压缩空气通过节流阀进入受电弓传动气缸，压缩风缸内的降弓弹簧连杆伸出，解除了对下臂杆上转臂的约束，此时受电弓在升弓弹簧的作用下升弓并使弓头滑板面与接触网导线保持接触。由于升弓的过程是压缩空气压缩降弓弹簧的过程，所以节流阀口的大小直接控制着压缩空气进入风缸的快慢。

节流阀口调好后，升弓初始时，降弓弹簧的压力最小，克服该力所需的气压较小，而节流阀口的进出气压差最大，此时气缸中活塞的移动较快，升弓迅速；随着弓头的不断上升，降弓弹簧的压力不断增大，克服该力所需的气压也不断增大，因此，节流阀口的气压差不断减小，进入气缸的气流减慢，此时升弓的速度也将减缓，从而实现了升弓时的先快后慢，避免了对接触网的有害冲击。升弓过程中升弓状态气路见图 2.3-162。

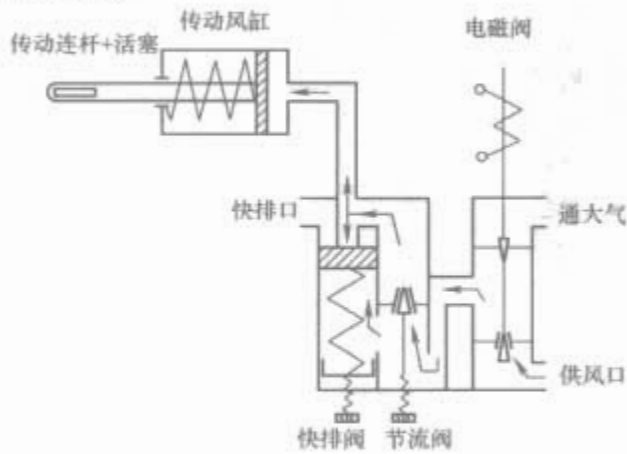


图 2.3-162 弹簧气缸式受电弓升弓状态气路

受电弓的降弓要求也是先快后慢。当弓头脱离接触网导线时，要求其动作迅速以避免产生拉弧，当受电弓落在机车上时要求其不得对车顶产生有害冲击，因此，降弓的过程可分为前一阶段的快速降弓和后一阶段的缓慢降弓，快速降弓过程如图 2.3-163 所示。

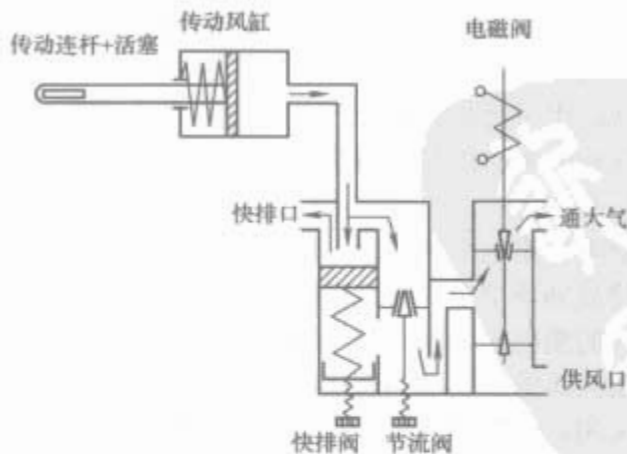


图 2.3-163 弹簧气缸式受电弓快速降弓过程

电磁阀失电，通风口通大气，风缸内气流通过节流阀口倒流排向大气。由于此时风缸内气压较大，作用于快排阀口的力大于弹簧所产生的力，所以快排阀口打开，风缸内的压缩空气通过快排阀口排向大气，由此实现降弓的迅速脱网过程。随着风缸气压的减小，作用于快排阀口的力不断减小，

当其不足以克服弹簧的作用力时，快派阀口关闭，风缸内气流只能通过节流阀口缓缓排向大气，这样就实现了缓慢降弓的过程，见图 2.3-164，保证了受电弓降至落弓位时不会对车辆产生有害冲击。

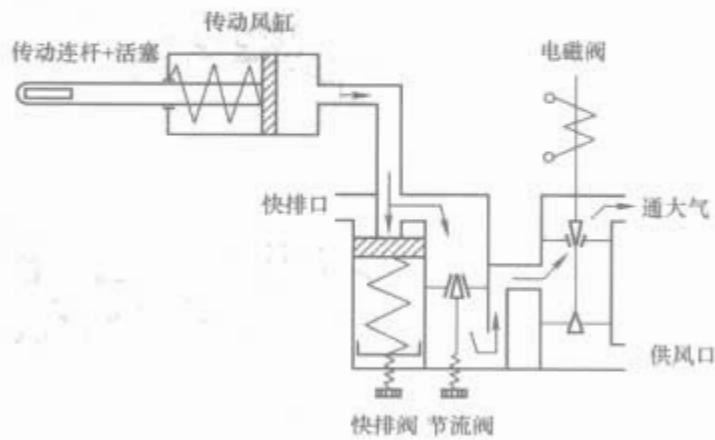


图 2.3-164 弹簧气缸式受电弓缓慢降弓过程

6.1.1.4 受电弓的使用和维护

(1) 受电弓的维护。使用前，应检查所有的紧固件状态是否良好；软编织导线是否完整，有断股严重的应及时更换；绝缘子不允许有裂缝，并应保持其干净整洁；集电头滑板应保持平整，连接圆滑，对已磨损到限的滑板及时更换。

(2) 气囊受电弓的调整。气囊受电弓的调试必须由两个人来进行（一个人在司机室，另一个在车顶部）。在进行调试工作之前，受电弓应进行几次（至少 2~3 次）升弓和降弓。使用测量范围为 0~100N 的弹簧秤进行测试。

1) 静态接触压力的调整。在车内把节流阀完全打开。初次调试时，把调压阀完全转到“—”位置（如果该阀已经被调试到操作位置，则调试时维持原样）。转动大约 9 圈，打开节流阀。把弹簧秤和受电弓的顶管相连，如果需要的话，在顶管上套上绳子。再次调整调压阀直到受电弓慢慢上升为止，然后在高出车顶 1.6m 处用弹簧秤来手动阻止受电弓的上升。弹簧秤应显示为 70N。

在图 2.3-165 中，向下运动时，力的最大值不超过 85N；向上运动时，力的最小值不小于 55N。两个值的变化都不应超过 20N。由于滑板的磨损（质量损耗），接触压力最大可以增加 10N，然而，这个过程不能调整压力，因为一旦安装上新的滑板时又恢复到以前的接触压力值，调压阀上的压力表的示值只能用于粗略检查，而不能用于调整校正目的。

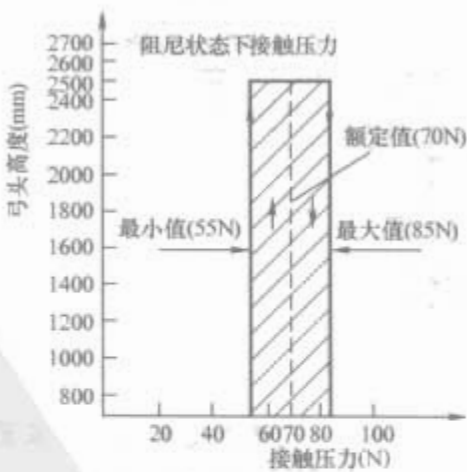


图 2.3-165 接触压力与弓头高度的关系

2) 升、降弓时间的调整。静态解除压力调好后，从受电弓的下限位置到滑板工作位置（即受电弓从下限位置升高约 2m）的升弓和降弓时间，各型号受电弓的升降弓时间见表 2.3-71，通过图 2.3-161 所示系统中的单向调速阀 2 和稳压阀 5 来调整。

升弓时不允许受电弓有任何回跳；降弓时受电弓不许跌落到橡胶减振器上。如果实际操作值与规定值有偏差，那么应该重新调试单向调速阀 2 和稳压阀 5。

3) 自动降弓装置的调试。受电弓的 ADD 控制阀不能经常操作，第一次动作时，ADD 控制阀必须调节到以下基本调试位置：自动降弓装置的关闭阀在“开”位置，自动降弓装置的试验阀在“工作”位置，关闭阀在“闭”位置时关闭试验阀和对滑板压缩空气的供应。

4) 橡胶减振器安装位置的检测。在下限位置，受电弓放在 3 个橡胶减振器和 1 个弓装配上。3 个橡胶减振器承载着整个受电弓活动框架，且在下限位置时，有弓装配来防护集电头。由于在调整顶部支撑面和受电弓底架间的扭曲会出现水平差异，安装到机车后，必须通过目测看底架上的橡胶减振器是否水平。必须确保上臂组装的顶管由 2 个橡胶减振器均匀支撑，且支撑下臂的橡胶减振器位置应稍低于下限位置。

5) 集电头的调整。集电头的调整包括集电头平衡的调整、集电头托架、集电头支架、拉簧组装和扭簧的调整。检查集电头在任意高度（工作范围内）的前后摆动量。若不是水平对称，则应调整集电头导向装置。通过改变集电头导向装置的长度，保持集电头滑板面的水平。集电头托架和集电头支架应上下活动自如，无阻滞现象，否则应对集电头进行详细的检查，找出影响集电头托架和支架运动的原因。

(3) 弹簧气缸式受电弓的调整。该项调整分以下 3 项进行：

1) 接触压力的调整。一般调整时，在弓头加挂 9kg 的重物，受电弓弓头应能在任一工作高度停留。若在工作高度的上限段不停留，则应改变升弓弹簧的变形量，加大或减小升弓力。然后，检查弓头在工作高度的下降段，若弓头不能停留，则应改变弧性调整板的倾角，即通过改变升弓弹簧的变形量使其满足要求。以上进行的只是粗略调整，精细的调整静态接触压力必须采用专用的静态接触压力试验台。

2) 升降弓时间的调整。一般先调节升弓时间，升弓时间的调整是通过改变节流阀口的大小，降弓时间的调整是通过调节快排阀口上的弹簧压缩量，从而调节快排时间的。这种调试过程要反复进行，互相兼顾，以便满足升降弓时间和动作的要求。

3) 弓头的调整。弓头的调整包括弓头平衡的调整和弹簧盒的调整。检查弓头在任意高度（工作范围内）的前后摆动量，若不是水平对称，则应调整平衡杆。通过改变平衡杆的长度，保持弓头滑板面的水平。弓头弹簧盒内装有弹簧杆和弓头弹簧。弹簧盒杆应上下活动自如，无阻滞现象，否则应对弓头进行详细检查，找出影响盒杆运动的原因。因为弓头受到来自接触网上硬点的冲击，随之使弓头发生变形，所以此项调整较为复杂。若为盒杆内弹簧的原因，则应更换弓头弹簧。

6.1.2 主断路器

主断路器是电力机车的一个重要电气部件，它担负着整车与接触网之间的电气引入、退出和保护作用。

电力机车主断路器从分断灭弧方式可分为空气断路器和真空断路器。空气断路器主要有 DAZ1 和 TDZ1 两种型号。真空断路器主要有 BVAC . N99、22CB、TDVA 三种型号，目前国内铁路干线电力机车多采用 BVAC . N99 型真空断路器。BVAC . N99 型真空断路器是一种利用压缩空气驱动、真空泡灭弧的主断路器，该设备安装在电力机车顶部，其设计的分合闸操动机构和动作原理完全适合于电力牵引的要求

和工作条件，具有结构简单、环境稳定性好、绝缘性能高、分断容量大、机械寿命长等特点。

6.1.2.1 技术参数

各类型的主断路器及主要技术参数见表 2.3-72。

技术参数	22CB	BVAC	ACB	TDZ1A
额定电压 (kV)	30	30	30	30
频率 (Hz)	50/60	50/60	50/60	50
额定电流 (A)	1000	1000	750	400
开断能力 (kA)	16	16	15	10
机械寿命 (万次)	20	25	20	2
固有分闸时间 (ms)	<40	20~60	<40	≤30
固有合闸时间 (ms)	<40	<60	<40	≤100
环境温度 (℃)	-50~+70	-40~+70	-25~+40	-25~+40
直流额定控制电压 (V)	72/110	48/72/110	110	110
灭弧方式	真空	真空	真空	压缩空气

6.1.2.2 结构

真空断路器结构如图 2.3-166 所示，分为高压、中间绝缘和控制 3 个部分。

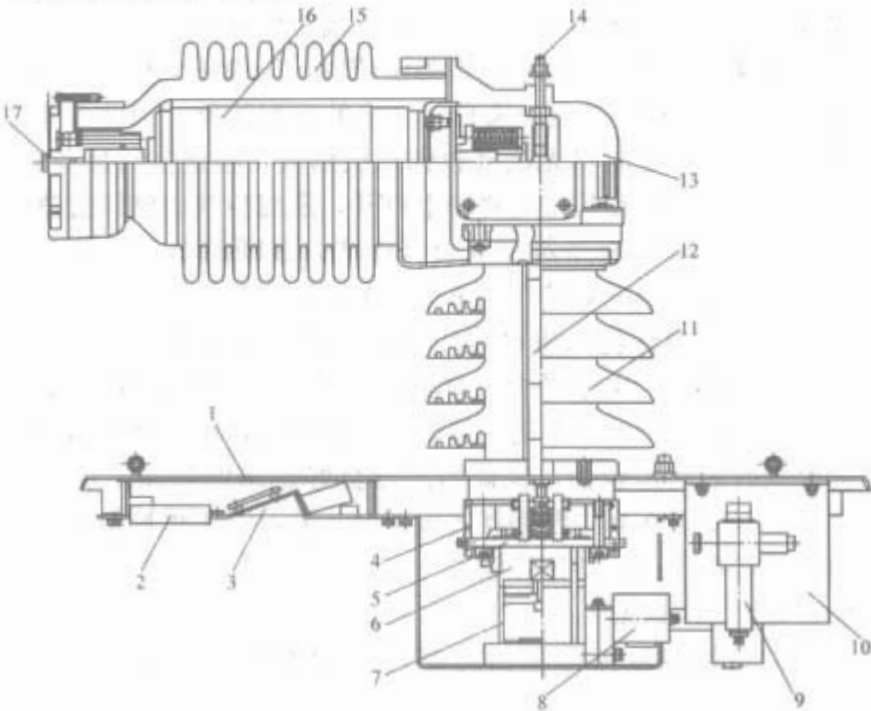


图 2.3-166 真空断路器结构图

- 1—底板；2—插座连接器；3—110V 控制单元；4—辅助触头；5—肘节机构；6—保持线圈；7—风缸；8—电磁阀；9—调压阀；10—储风缸；11—垂直绝缘子；12—绝缘操纵杆；13—传动头组；14—高压连接端（HV1）；15—水平绝缘子；16—真空开关管组；17—高压连接端（HV2）

(1) 高压部分。高压部分结构如图 2.3-167 所示，包括水平绝缘子、真空开关管组和传动轴头组等。真空开关管组安装于水平绝缘子内部，构成机车顶上的高压电路，确保开断交流电弧。真空开关管通过密封和大气隔离，包括动触头、静触头和瓷质外罩等。

(2) 中间绝缘密封部分。中间绝缘部分包括如图 2.3-166 所示的垂直绝缘子、底板以及安装于车顶与断路器之间的 O 形密封圈。垂直绝缘子安装在底板上，用以提供 25kV 的绝缘要求，同时绝缘操纵杆通过垂直绝缘子的轴向中心孔，连接电空机械装置和真空开关管的动触头。底板安装于车顶，O 形密封圈用以保证断路器与车顶之间的密封。

(3) 控制部分。控制部分包括如图 2.3-166 所示储风

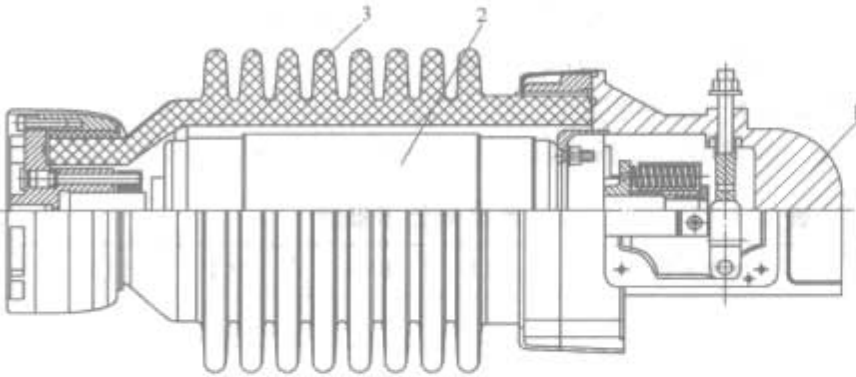


图 2.3-167 高压部分

1—传动轴头组装；2—真空开关管组装；3—水平绝缘子

缸、调压阀、压力开关、电磁阀、风缸、保持线圈、肘节机构、110V 控制单元等操纵控制部件。

交流真空断路器采用电空控制。该控制机构通过压缩空气管路，给断路器快速合闸过程提供必需的压力。储风缸是实现断路器气动控制的气压源，在机车风源关断时，其储存压缩空气量至少能够满足断路器的一次操作；调压阀安装在断路器进气口与储风缸之间，通过它对气压值进行预设整定，用以保证进入储风缸内的气压能充分满足断路器的正常动作，同时，调压阀上安装有一个空气过滤阀，以保证进入储风缸气体的清洁与干燥；压力开关（图中未示出）安装于储风缸上与调压阀相对的一侧，用以监控断路器储风缸的压力，当储风缸内气压低于预设整定值时，压力开关打开，同时断开 110V 控制单元中来自司机室的控制线路，因此，断路器在气压不足时将无法接收到司机信号，拒绝进行操作；电磁阀在得到操作信号时将得电打开，压缩空气由储风缸进入传动风缸驱动断路器完成合闸操作，在断路器合闸到位后，它在延迟继电器的作用下失电关闭，切断气源；传动气缸把空气压力转化为机械作用力；保持线圈安装于气缸上部，通过得电产生电磁力，对驱动活塞起到吸合保持作用，实现了断路器合闸状态的保持；肘节机构用以实现真空断路器分闸时的快速脱扣，保证断路器良好迅速的分断；110V 控制单元安装在真空断路器底板下部，通过其逻辑控制单元对断路器操作进行整体控制。

6.1.2.3 工作原理

真空断路器操作包括分闸与合闸操作（参见图 2.3-168）。

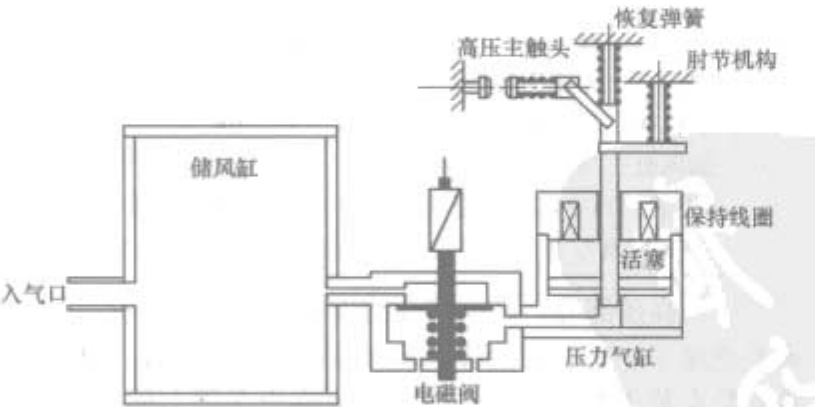


图 2.3-168 真空断路器操作原理图

- (1) 合闸操作。只有满足如下条件，断路器才能闭合：
- 1) 主断路器必须是断开的；
 - 2) 必须有充足的气压。
- 具体合闸过程如下：
- 1) 按“开/关”键。
 - 2) 电磁阀得电，气路打开。
 - 3) 压缩空气由储风缸通过电磁阀流入压力气缸，推动

- 活塞向上运动。
- 4) 主动触头随着活塞的移动而运动。
 - 5) 恢复弹簧压缩。
 - 6) 主触头闭合。
 - 7) 触头压力弹簧压缩。
 - 8) 活塞到达行程末端。
 - 9) 保持线圈在保持位置得电。
 - 10) 电磁阀失电。
 - 11) 压力气缸内的空气排出。
- (2) 分闸操作。
- 1) 保持线圈失电。
 - 2) 活塞在弹簧力作用下（恢复弹簧、肘节机构等）移动。
 - 3) 主触头打开，真空开关管灭弧。
 - 4) 行程结束，活塞缓冲。

电空接触器通过控制电空阀得电，使压缩空气进入传动气缸，克服返回弹簧的作用，推动气缸的活塞杆、绝缘杆、触头杠杆支架，使动、静触头闭合。当电空阀失电时，在气缸内返回弹簧的作用下使触头分断。当触头带电分断时，在吹弧线圈的帮助下，电弧经动静触头、弧角引入灭弧室，使电弧熄灭。

灭弧室为横缝多圈电弧灭弧室。电弧由动、静触头弧角引入灭弧室后，经灭弧室内分弧角分别送进各个横缝中，此时电弧在灭弧室内呈多圈螺旋式，灭弧室由多层灭弧板叠装而成。拿取灭弧板时，只需把挂钩拉开，让灭弧室往前倾倒下来就可取走。

6.1.2.4 检修与维护

主断路器上所有的检查和维修必须在断开电源、降下受电弓及断路器接地的前提下进行操作。断路器出现损坏和故障必须由经过培训的专业技术人员进行维修，否则不能保证断路器能够恢复可靠操作和相关的安全可靠性能。

(1) 辅修（3 个月）。

1) 外观检查（易损件：主压缩弹簧，只要需要就必须更换）。进行断路器的外观检查和绝缘子检查（图 2.3-169 中 A）和 BTE 接地开关连接附件的检查（图 2.3-169 中 B）。更换条件见表 2.3-73。

表 2.3-73 更换条件	
部件	检 查
A	裂纹或绝缘子的瓷釉和密封件的损坏
B	接地绝缘子（参考易损件）的连接件的损坏

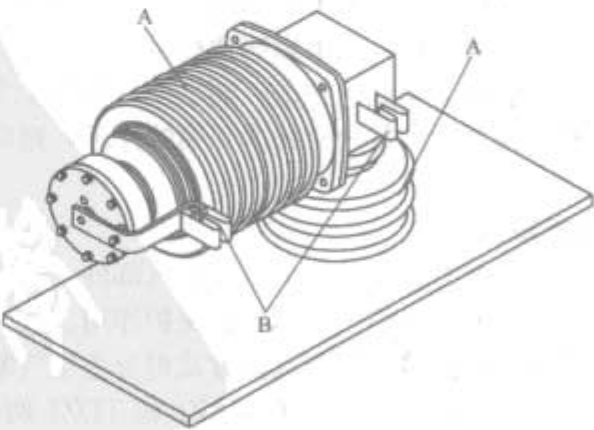


图 2.3-169 真空断路器外形

A—绝缘子；B—BTE 接地开关连接附件

用软制品或布把真空断路器外部清理干净。根据用户的推荐，绝缘子的外部可以用硅树脂油脂进行清洗。

注意：禁止使用任何含有氟酸盐或氯酸盐成分及钠硅酸盐的产品清洗部件。

2) 拧紧力矩检查。用力矩扳手检查图 2.3-170 中 A、B、C 部件的拧紧力矩，对应的力矩值见表 2.3-74。

表 2.3-74 拧紧力矩

部件名称	检 查	拧紧力矩 (N·m)
A	高压连接端	67
B	接地连接端	50
C	断路器固定螺栓	67

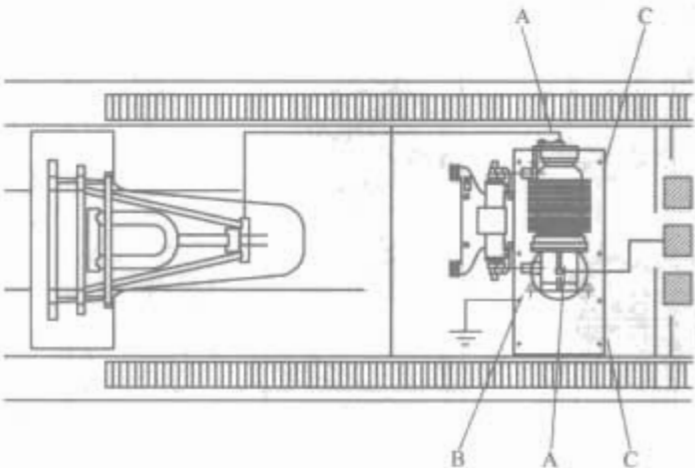


图 2.3-170 装有真空断路器的车顶视图
A—高压连接端；B—接地连接端；C—断路器固定螺栓

3) 气路检查（易损件：储风缸管堵、损坏不能连接、密封，更换）。为了保证气路元件正常动作，将断路器管路中容易积水的器件（如调节阀内、储风缸底部）定期排水。储风缸示意如图 2.3-171 所示。

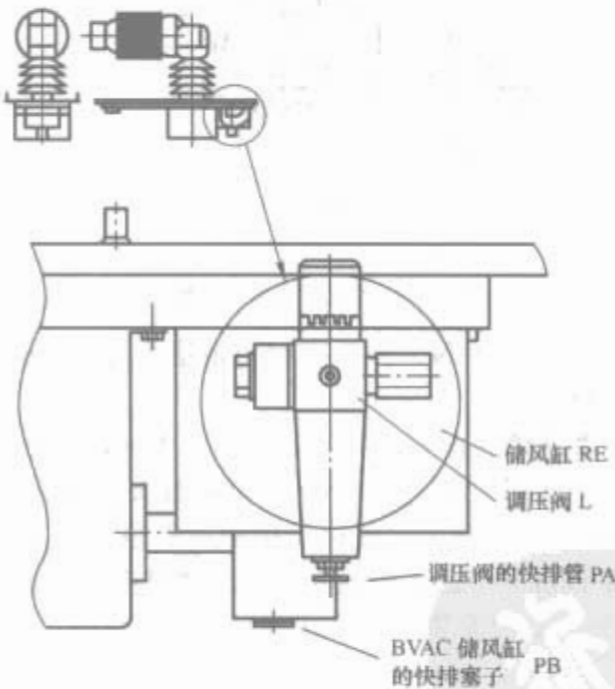


图 2.3-171 储风缸示意

- a. 调压阀的排水（L）。在储风缸供有高压气体的情况下，拧开调压阀的翼形螺钉（PA）充分排放积水，当气流停止，重新拧紧调压阀的翼形螺钉并检查是否漏气。
- b. 储风缸排水（RE）。关闭隔离阀，慢慢拧开位于储风缸下面的管堵（PB）并释放压缩空气；一旦压力完全下降，完全打开塞门；慢慢打开主气路的隔离阀，让空气从出气口排出，直到储风缸积水排尽；关断主气路的隔离阀，拧紧管堵，检查是否泄露。
- c. 密封件气密性能检查。在排放完断路器气路系统的积水后，必须检查连接断路器主要管道的气密性，包括连接器的密封件、塞门密封件和软管连接的密封件。

注意：在冬季之前排放气路，以免积水冻结造成气动元件误操作。

(2) 小修（1 年或出现特殊情况，如出现不明短路电流、击穿放电、不正常机械振动）。为了得到真空泡里真空状态的情况，可用对 2 个高压连接端（分断状态下）打耐压的方式，施加工频电压 40kV 的电压 10s。如果真空泡里的真空度是合格的，但是电寿命和机械寿命已经超出，也应该更换真空泡或整个更换真空断路器。

(3) 中修（5 年或参照机械寿命）。检查内容：
真空泡触头磨损量检查（易损件：传动头管堵，必须更换）。检查位置为 OBR_{new} 分断状态下弹簧恢复位置、OCM_{new} 分断状态下动触头的位置、CBR_{new} 闭合状态下弹簧压缩位置、CCM_{new} 闭合状态下动触头位置。

测量结果应与试验大纲中的要求保持一致。把测量结果和没使用前的测量结果填写在一张常规试验单据上进行比较。它一定要满足下列 3 个条件：

- 1) $2\text{mm} < [(OBR_{\text{new}} - CBR_{\text{new}}) - (OCM_{\text{new}} - CCM_{\text{new}})] < 4.25\text{mm}$ 。
- 2) $CCM_{\text{new}} - CCM_{\text{original}} < 2\text{mm}$ 。
- 3) $19\text{mm} < OBR_{\text{new}} - CBR_{\text{new}} < 20.5\text{mm}$ 。

如果这 3 个条件没有满足，必须更换真空断路器或真空泡。更换真空泡必须有专门的技术文件作为指导，或者由制造商来执行此操作。更换了真空泡后，必须进行例行试验。如果主触头磨损不是非常大，但是其电寿命和机械寿命已经超出了极限，也要替换真空泡或更换整个真空断路器。

6.1.3 高压隔离开关

高压隔离开关属于车顶保护电器。它的主要作用是优化配置 25kV 电路内高压设备的运行工况，并当车顶设备发生故障时，能将故障部分隔离，维持机车运行。因此，它可大大减少因车顶设备故障而造成的机破事故，保证机车的运行安全。高压隔离开关根据驱动方式可以分为手动和气动；手动的主要有 THG2 型和 THG2A 型，气动的主要有 THG1 型和 BT25.04 型。目前国内应用最多的是手动的 THG2A 型，但随着交流大功率机车的运用，气动型的 BT25.04 将逐渐占据国内市场。

6.1.3.1 技术参数

上述几种型号的高压隔离开关主要技术参数见表 2.3-75。

表 2.3-75 高压隔离开关主要技术参数

参 数	THG1	THG1A	THG2	THG2A	BT25.04
标称电压 (kV)	25	25	25	25	25
额定电压 (kV)	30	30	30	30	30
额定电流 (A)	400	400	400	400	400
峰值耐受电流 (kA)	7.9	7.9	7.9	7.9	40
短时耐受电流 (kA)	3.15, 2s	3.15, 2s	3.15, 2s	3.15, 2s	16, 1s
额定工作气压 (kPa)	500	500	无	无	400~600
直流额定控制电压 (V)	DC 110	DC 110	无	无	DC 110
机械寿命 (次)	3000	3000	3000	3000	20000
操作方式	气动	气动	手动	手动	气动

6.1.3.2 结构

如图 2.3-172 所示, BT25.04 高压隔离开关通过法兰安装在车顶上一个 10mm 厚的铝底板 5 上。它装有一个接触闸刀 11, 一端固定在绝缘子 4 上, 另一端连接在通过底板 5 延伸到车内的转轴 9 上。簧片 3 也是通过绝缘子 4 安装在底板上的。在底板下边, 传动气缸操纵杆机构 10 安装在转轴上, 因此保证了接触闸刀 11 的转动。转轴末端上的 2 个凸

轮 13 是用来控制安装在左右支撑板 8 和 7 上的 2 个辅助触头开关 12 的。底板 5 装有用来安装压力气缸 1 旋转的支架, 还有一个用来安装电磁阀的托架。在底板的更下一些, 安装一块控制单元板 2, 用于电磁阀和连接凸轮开关电源的导入。同时, 底板上边还装有一个 M8 的螺钉 6, 用于连接到机车的接地系统。

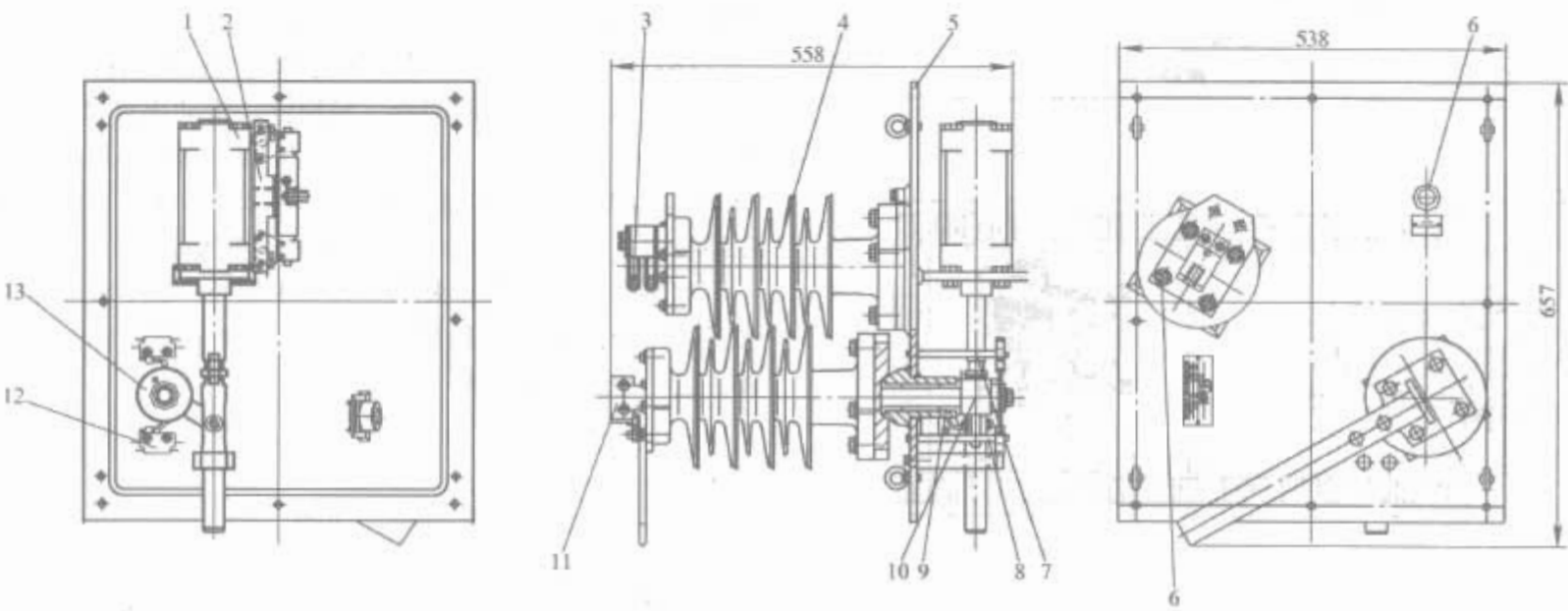


图 2.3-172 高压隔离开关总图

1—压力气缸; 2—控制单元板; 3—簧片; 4—绝缘子; 5—底板; 6—螺钉; 7—右支撑板; 8—左支撑板; 9—转轴; 10—操纵杆机构; 11—接触闸刀; 12—辅助触头开关; 13—凸轮

6.1.3.3 工作原理

(1) 分闸。当高压隔离开关处于合闸状态时, 电磁阀得到分闸信号, 得电动作, 打开气路, 压缩空气经电磁阀进入压力气缸, 推动操纵杆, 使转轴旋转 60° , 隔离开关分断。转轴转动的同时, 固定在主轴上的凸轮驱动低压联锁改变为分闸状态, 并将信号传到司机室。

(2) 合闸。当高压隔离开关处于分闸状态时, 电磁阀得到合闸信号, 得电动作, 打开气路, 压缩空气经电磁阀进入压力气缸, 推动操纵杆, 使转轴旋转 60° , 隔离开关闭合。转轴转动的同时, 固定在主轴上的凸轮驱动低压联锁改变为合闸状态, 并将信号传到司机室。

高压隔离开关不带灭弧装置, 不具有开断电流的能力, 因此, 它的所有动作都必须在主断路器处于分断状态时进行。

6.1.3.4 检修与维护

(1) 小修。每个月进行一次小修, 检查隔离闸刀与刀夹的接触性能是否良好。将隔离闸刀打开, 检测刀夹在自由状态下两弹簧片间的距离小于或等于 7.5mm, 闸刀接触部分厚度大于或等于 9mm。绝缘子应保持整洁干净, 表面无裂纹或碰痕。检查各风管接头是否漏水, 润滑各滑动配合面及连杆销。

(2) 中修。每 6 个月要进行一次中修。用酒精清洗各联锁触头的触点, 检查各联锁触头接触状况是否良好, 接触不良者必须更换。同时检查隔离闸刀和接触簧片的状况是否良好, 旋转机构能否自由转动, 传动气缸和电磁阀能否正常动作, 有损坏零部件必须更换。

(3) 大修。每 3 年要进行一次大修。主要检查的部件为接触闸刀和簧片, 并检查所有部件能否正常动作。更换损坏零部件和报废部件, 需要清洗和润滑的部件必须进行单独的维护, 特别是要对辅助开关触头和凸轮进行润滑。

1) 簧片的检查。如图 2.3-173 所示, 检查簧片的摩擦

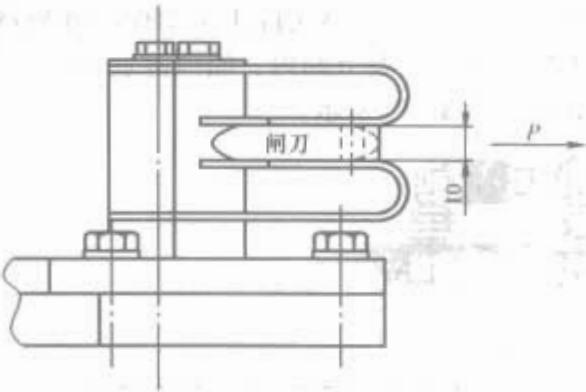


图 2.3-173 簧片示意

力是否在 (30 ± 10) N 之间, 接触间距是否为 10mm, 达不到要求则应更换。

2) 辅助联锁的检查。如图 2.3-174 所示, 检查接触压力应为 3N, 接触宽度为 3.2mm。如果触头磨损至 1.5mm 或更少, 必须更换开关。在辊子接触顶部位置 (需要最小 0.25mm 的间隙) 上凸轮的地方, 无论如何不允许出现触头的磨损, 触头必须安装防尘罩。

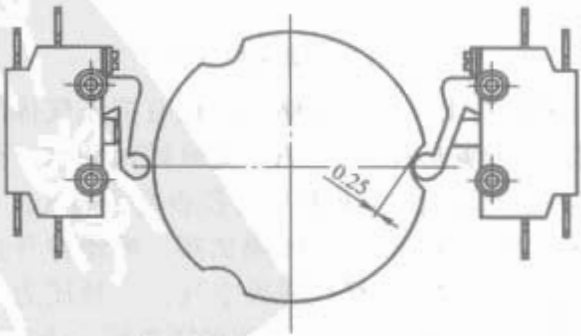


图 2.3-174 凸轮与辅助联锁示意

3) 润滑。在大修期间, 要清洁接触闸刀和隔离开关的连接处并紧固, 同时要涂一些油脂。这些操作应在机车与电网断开且整个回路接地的安全前提下进行。

用乐泰 8104 硅脂润滑滑动套筒，用 Molykote G-n 润滑油润滑簧片。

所有检修完成后必须进行性能测试，各技术参数及动作性能都必须满足试验大纲的要求。

6.1.4 高压接地开关

高压接地开关的主要功能是把牵引机车上主断路器两侧的电路接地。接地开关保证了牵引机车的安全操作；当工作人员进行机车检查或维护，消除缺陷或进行修理时，保证工作人员的人身安全。目前国内大多数机车上都只是采用接地线进行接地，其安全性能和可操作性都不高，现有的几种接地开关主要有 THJ1、TQJ3、BTE25.04 等几种型号。BTE25.04 高压接地开关主要是通过手动操作来完成“接地位”和“运行位”之间的转换，它具有需求空间小、结构坚固可靠、所需维护小、极端条件下操作可靠等优点。

6.1.4.1 技术参数

上述几种型号的高压接地开关主要技术参数见表 2.3-76。

表 2.3-76 高压接地开关主要技术参数

参 数	THJ1	TQJ3	THJ3	BTE25.04
标称电压 (kV)	25	25	25	25
额定电压 (kV)	29	29	29	30
额定电流 (A)	400	400	400	400
峰值耐受电流 (kA)	无要求	7.9	无要求	40
短时耐受电流 (kA)	无要求	3.15, 2s	无要求	16, 1s
闸刀转换角度	102°	无	102°	102°
机械寿命 (次)	3000	3000	3000	20000
操作方式	手动	手动	手动	手动
放电间隙 (mm)	无	110±1	无	无

6.1.4.2 结构

如图 2.3-175 所示，高压接地开关主要分车外部分和车内部分。车外部分主要包括上罩、闸刀、触头弹簧片以及在上罩内的轴等传动机构；车内部分主要包括下罩、操纵杆组装、锁组装以及在下罩内的传动机构。

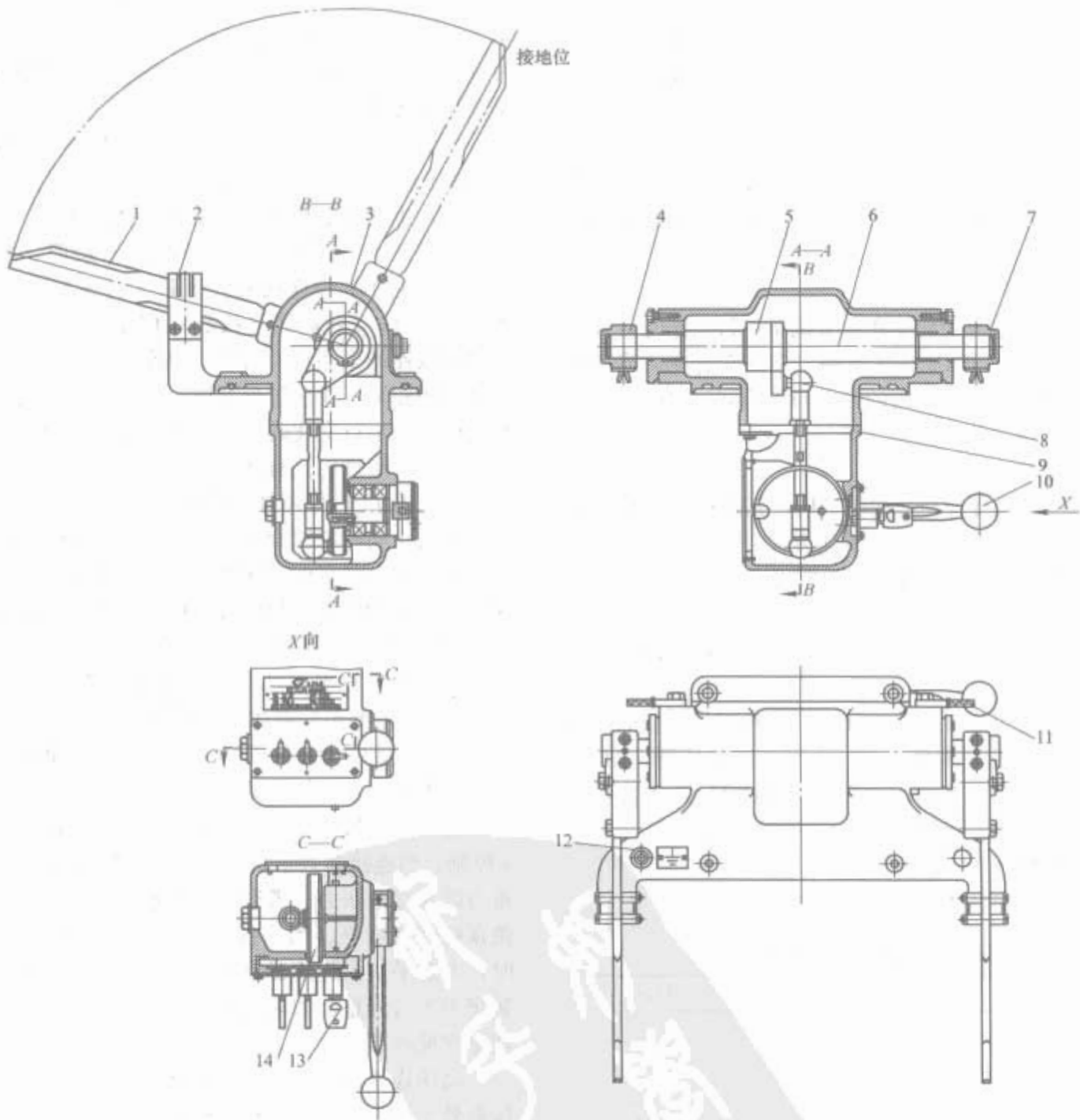


图 2.3-175 高压接地开关总图

1—闸刀；2—触头弹簧片；3—上罩；4—左支架；5—曲柄组装；6—轴；7—右支架；8—连接杆组装；9—下罩；10—操纵杆组装；11—软连线；12—接地螺栓；13—锁组装；14—转盘组装

6.1.4.3 工作原理

闸刀通过支架安装在轴上，而轴、曲柄组装、连接杆组装以及操纵杆组装则组成一个传动机构，转动操纵杆，使整个传动机构进行传动，进而使轴带动闸刀旋转一定的角度。

根据设计，在操纵杆从一端旋转 180°到另一端时，闸刀也相应从“运行位”旋转 102°到“接地位”或者从“接地位”旋转 102°到“运行位”。而控制是否能够转动的是锁组装。锁组装共有 3 个锁，其中一个供蓝色钥匙使用，其余 2 个供黄

色钥匙使用。仅在蓝色锁被蓝色钥匙打开后，操纵杆才能从“操作”位置旋转到“接地”位置。一旦旋转到“接地”位置，联锁机构就被带有黄色钥匙的锁锁在此位置，然后可把钥匙从锁中拔下来。

6.1.4.4 检修与维护

- (1) 小修。小修应直接在机车上进行，每 3 个月一次。要对闸刀和触头弹簧片的状况进行视觉上的检查，即检查它们的外观、磨损和清洁度。如果在检查期间发现闸刀和触头弹簧片存在污秽等杂物，则应对它们进行彻底的清理并加润滑脂。
- (2) 中修。中修应直接在机车上进行，每年一次。应检查闸刀和触头弹簧片的磨损和清洁状况以及传动机构的动作情况，还应检查闸刀能否准确地滑入主断路器的触头弹簧片里，然后检查联锁机构即锁组装的联锁情况。如果在检查期间发现闸刀和触头弹簧片存在污秽等杂物，应对它们进行彻底的清理并加润滑脂。
- (3) 大修。每 3 年进行一次大修。此检查应在机务段内进行，在机务段内悬挂线电力可以断开，并且整个系统可以接地。在检查之前，应彻底清洗整个接地开关。应像中修那样进行所有操作，然后检查接地开关零部件的机械状况和功能，应更换受损或磨损的部件。最后，应对闸刀和触头弹簧片加润滑脂。

(4) 维护。根据牵引机车的运行小时数，按规定应对接地开关的闸刀和触头弹簧片进行彻底的清理，并涂少许润滑脂。这些操作应在悬挂电力可以断开，并且整个系统可以接地的机务段内进行。

6.1.5 高压连接器

高压连接器的主要功能是在两节机车进行连挂时，自动连接两节机车车顶的 25kV 高压电路。它被安装在每节车的尾部车顶，依靠机车连挂车钩的力量与车钩同时对接，分离时也随机车的车钩脱开而自动分离。

- 高压连接器的主要特点是：
- (1) 高压连接器自身不带动作机构，其连接与分离都随机车车钩连挂和脱开同时完成，操作方便。
 - (2) 高压连接器不带灭弧装置，所以必须在无电状态下进行分合操作。
 - (3) 两节车的高压连接器构造完全一致，具有良好的互换性。

高压连接器主要有 TLG1 和 TLG2 两种型号。目前国内铁路干线重联电力机车多采用 TLG1 型高压连接器。TLG2 型高压连接器是 TLG1 型的改进型号，相对 TLG1 型高压连接器，它具有更高的绝缘性能和更长的机械寿命。

6.1.5.1 技术参数

高压连接器主要技术参数见表 2.3-77。

表 2.3-77 高压连接器主要技术参数		
技术参数	TLG1	TLG2
额定电压 (kV)	30	30
额定电流 (A)	400	400
额定频率 (Hz)	50	50
接触电阻 ($\mu\Omega$)	≤ 650	≤ 650
左右摆动角度	$\geq 34^\circ$	$\geq 34^\circ$
上下摆动角度 ($\alpha=34^\circ$)	$\geq 8.5^\circ$	$\geq 8.5^\circ$
机械寿命 (次)	3000	20 000

6.1.5.2 结构

高压连接器结构如图 2.3-176 所示，分为高压导电、十字轴支承和绝缘 3 个部分。

(1) 高压导电部分。高压导电部分结构如图 2.3-176 所

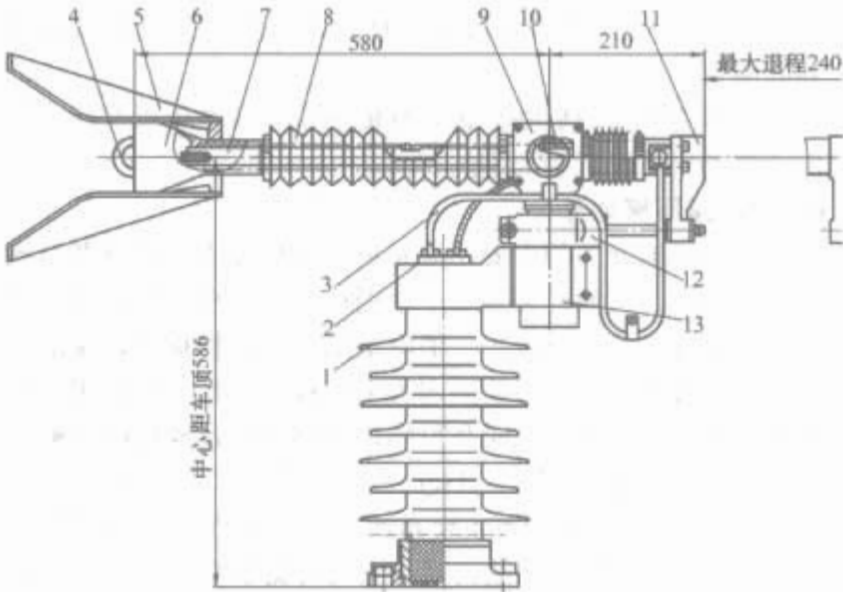


图 2.3-176 高压连接器

- 1—支持绝缘；2—导电板；3—软连线；4—半圆环；5—羊角；6—喇叭形头部；7—导电杆；8—波纹管；9—十字轴支撑座；10—主弹簧；11—锁止器；12—球面止挡；13—缸体

示，主要包括半圆环 4、羊角 5、喇叭形头部 6、导电杆 7、波纹管 8、十字轴支撑座 9、主弹簧 10 和锁止器 11 等。它是高压连接器的导电主体部分。

导向羊角 5 在水平及垂直方向具有较宽的导向范围，当 2 台高压连接器对接时，即使它们在水平或垂直方向存在错位误差，也能保证良好的自动导向对接性能。

主弹簧 10 在橡胶波纹管 8 内。对接前，高压连接器不受外力，主弹簧使连接器处于最大伸张状态，为对接作准备。对接时，2 台高压连接器互相压缩，当压缩力足够时，一台连接器的半圆环 4 与另一台连接器喇叭形头部 6 内的叉形件互相扣紧，连接过程完毕。当 2 台高压连接器之间的距离随机车的运行变化时，主弹簧也随之拉伸或压缩，以保持半圆环与叉形件的接触状态，保证连接器优良的导电性能。

锁止器 11 的作用是：当高压连接器作上下左右摆动时，其下部的止动杆与球面止挡上的锥形凹槽形成自复位机构，它们能使自由状态的连接器高压导电部分复位至中心位置并保持在初始状态。当单台连接器处于自由状态时，锁止器 11 也使主弹簧 10 保持一定的初始压力。

(2) 十字轴支撑部分。十字轴支撑部分结构如图 2.3-177 所示，主要包括缸体 1、板簧 2、轴承 3、卷簧 4、止动板 5、十字接头安装 6、调整螺钉 7 和密封圈 8。它是控制高压连接器上下左右摆动的机构。

高压连接器上下摆动由板簧 2 及十字轴支撑座内的卷簧 4 控制。当连接器处于自由状态时，板簧弹力、连接器头部重力以及卷簧张力三者形成的力矩构成力矩平衡状态，从而使顶杆保持水平。当连接器由上下摆动状态回到自由状态时，力矩平衡使连接器复位至初始状态。调整螺钉 7 能对卷簧张力进行调整，如果连接器上下方向不能复位，可以通过调整它使连接器复位。

高压连接器左右摆动由缸体 1 中的扭力弹簧控制。当连接器处于自由状态时，扭力弹簧也处于自由状态。当连接器左右摆动时，扭力弹簧产生的力矩与外力力矩平衡，外力撤消后，连接器高压导电部分依扭力弹簧的作用复位至初始状态。如果连接器左右方向不能复位，需要调整扭力弹簧上下的定位螺钉使连接器复位。

此外，在不同轮箍磨损情况的机车对接时，可预先调整连接器的安装高度，使两台高压连接器基本处于同一水平面上。如图 2.3-177 所示，缸体上的刻度线便是作高度调整时

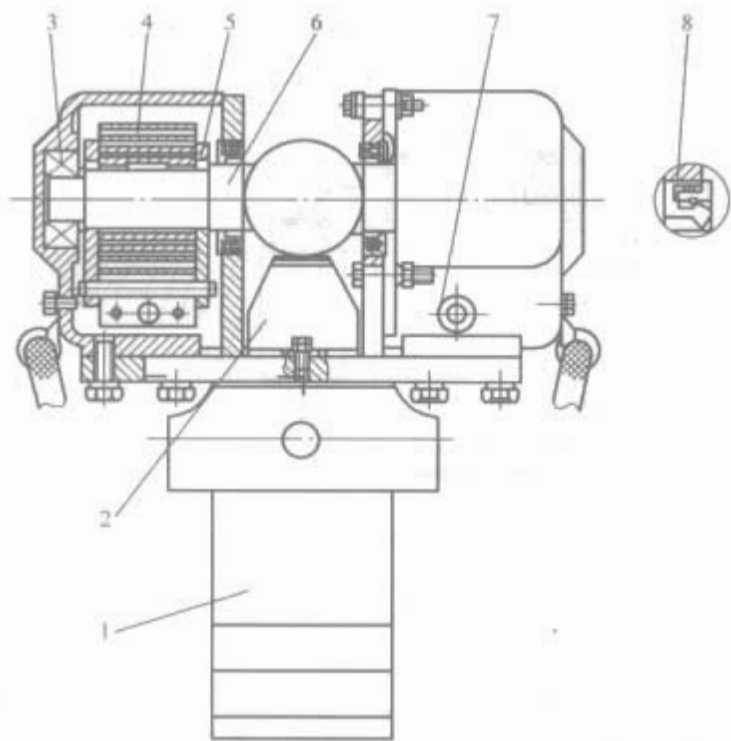


图 2.3-177 十字轴支撑部分
1—缸体；2—板簧；3—轴承；4—卷簧；5—止动板；
6—十字接头安装；7—调整螺钉；8—密封圈

用的。

(3) 绝缘部分。高压连接器绝缘部分就是它的支持绝缘子。它将连接器的高压导电部分和十字轴支撑部分固定在车顶并与车顶电气隔离。高压连接器的绝缘子有 3 种类型，即瓷质绝缘子、环氧绝缘子及硅橡胶绝缘子。TLG1 型高压连接器使用的是瓷质绝缘子，TLG2 型高压连接器使用的是复合材料绝缘子（即环氧绝缘子或硅橡胶绝缘子）。

6.1.5.3 工作原理

(1) 对接。当高压连接器被固定在车顶后，它依靠机车车钩连挂时的力量自动对接。当两台连接器靠近时，在羊角的导向作用下，喇叭形头部对接，同时，主弹簧也开始受力压缩。当压缩到一定量，一台连接器的半圆环和另一台连接器的叉形件在外力作用下互相扣紧，对接过程完毕。高压连接器接合状态下的电流路径是：从一节车的高压回路到导电板，再经软连线到导电杆；然后通过喇叭形头部内的分流线、叉形件及半圆环到另一台连接器的半圆环、叉形件、分流线、导电杆、软连线及导电板；最后经导电板到另一节车的高压回路。

(2) 分离。当 2 节机车车钩脱开后，高压连接器随之自动分离。当两台连接器分离时，连接器由压缩状态至自由状态，再由自由状态至拉伸状态，同时，主弹簧也开始受力拉伸。当拉伸到一定量，一台连接器的半圆环和另一台连接器的叉形件在外力作用下脱扣分开，分离过程完毕。

6.1.5.4 检修与维护

高压连接器上所有检查和维修必须在断开电源，降下受电弓和车顶电气接地的前提下进行操作！高压连接器出现损坏和故障，必须由经过培训的专业技术人员进行维修，否则不能保证连接器能够恢复可靠操作和相关的安全可靠性能！

(1) 保证在无电状态下进行分合操作。在进行接合操作前注意观察喇叭形头部内的叉形件，看是否有回弹的情况，如果已回弹，则需用工具将其拉开到开启状态，然后才能进行接合操作。

(2) 保持绝缘子表面上的清洁。绝缘子表面不允许有裂纹或损伤，否则应予以及时更换。

(3) 检查橡胶波纹管，如有破损应及时更换，以免雨

水、灰尘进入喇叭型头部与十字接头安装结构内，造成零件锈蚀，影响动作性能。

(4) 对各转动部分进行润滑处理，使之能上下左右按规定摆动并复位。如果单节连接器头不能保持水平时，可以由十字支撑件上的调整螺钉进行调整。

(5) 通过观察连接器上下左右摆动情况及前后伸缩情况，了解卷簧、扭簧和弹簧的机械性能，如果出现不能自由摆动、伸缩或不能自行复位的情况，应及时进行检查。

(6) 更换波纹管时，应将喇叭型头部盖板拆下，松开与顶杆的连接螺栓。松开卡箍后方能进行。

(7) 调整喇叭型头部高低时，用支撑座上的调整螺钉进行调整，顺时针调为高，逆时针调为低。

(8) 长期存放后，使用前须进行 75kV（1min）耐压试验，合格后方能装车。

6.1.6 高压互感器

6.1.6.1 高压电流互感器

电流互感器装设于机车车顶，处于牵引变压器网侧（高压）绕组的进线端，是一种专门用作变换电流的特种变压器。电流互感器的主要作用是：给测量仪器、仪表和继电保护、控制装置传递信息；使测量、保护和控制装置与高电压相隔离；有利于测量仪器和继电保护、控制装置小型化和标准化。

目前，机车上广泛运用了 TBL1-25、TBL2-25 型高压电流互感器。

(1) 技术参数。高压电流互感器的技术参数参见表 2.3-78。

表 2.3-78 高压电流互感器的技术参数		
技术参数	TBL1-25 型	TBL2-25 型
额定电流比	200/5	300/5
额定电压 (kV)	25	25
额定二次负载 (cosφ=0.8) (Ω)	1.6	1.6
准确级次 (P)	10	10
准确限值系数	6	6
相数	单相	单相
频率 (Hz)	50	50
冷却方式	—	自冷
绝缘等级 (级)	—	B
功率因数	—	0.8 (滞后)
质量 (kg)	95	90

(2) 结构。高压电流互感器的结构如图 2.3-178 所示，采用穿墙式设计，其一次绕组（高压部分）是用一根圆铜棒与牵引变压器网侧绕组的 A 端相连，二次绕组（低压部分）接电流继电器，用作主电路短路保护用。它是保护级电流互感器，要求具有良好的过电流工作特性，具有较大的饱和倍数。

高压电流互感器一次绕组匝数为 1，两端有螺纹，用来连接载流导线，二次绕组采用双玻璃丝包围铜线，均匀绕成。

铁心和绕组一起装在

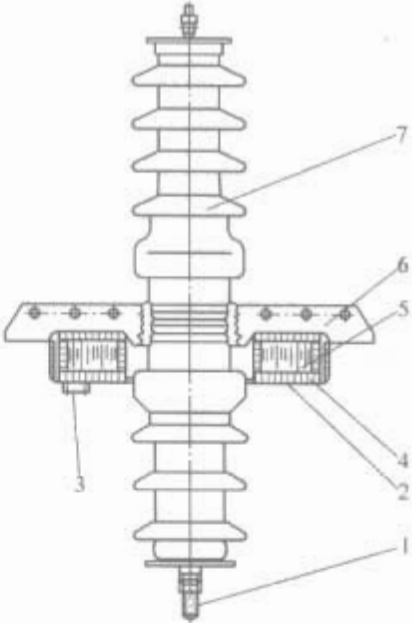


图 2.3-178 高压电流互感器结构图
1—一次线圈；2—护罩；3—接线座；4—二次绕组；5—铁心；
6—半法兰；7—瓷套

有两个铝制半法兰拼成的法兰盘中。两个半法兰由螺栓连成整体，下部用薄钢板制成的护罩盖紧，用绝缘纸圈作为二次线圈对法兰盘、护罩的绝缘。互感器通过两个半法兰安装于车顶，因此，互感器外壳是接地的。

(3) 工作原理。电流互感器基本工作原理与变压器相同，是利用电磁感应原理工作。电流互感器一次侧额定电流 I_{1N} 与二次侧额定电流 I_{2N} 之比，称为电流互感器的额定电流比 K_N ，即

$$K_N = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} = \frac{N_2}{N_1}$$

式中： N_1 、 N_2 分别为一次侧、二次侧绕组匝数。

电流互感器在运行中，由于有励磁及铁心损耗，需要很小一部分励磁电流，因而由二次电流 I_2 按电流比 K_N 折算到一次侧的电流 $I_2 K_N$ 与一次侧实际电流 I_1 有差值，这个差值以百分数表示，即为比差 f

$$f = \frac{K_N I_2 - I_1}{I_1} \times 100\%$$

通常 $I_2 K_N < I_1$ ，所以 f 一般为负值。如果 $I_2 K_N > I_1$ (如为容性负载时)， f 就为正值。

励磁电流还会产生相角差 δ 。相角差是指实测的一次电流的电流矢量同反转 180° 后的二次电流矢量的夹角，单位为“°”。

影响电流互感器误差的因素有：

- 1) 电流互感器的误差与二次回路总阻抗成正比。
- 2) 电流互感器的误差与一次安匝成反比。
- 3) 增加铁心的有效截面积，减少铁心的平均磁路长可使误差减少。
- 4) 铁心的磁导率越高，误差就越小，另外，负荷功率因数和铁心损耗角的变化都会引起误差的变化。

(4) 使用与维护。电流互感器在使用中应注意电流互感器的以下特点：

- 1) 一次侧电流是主电路电流，与互感器的二次侧负载无关。
- 2) 电流互感器的二次负载阻抗必须很小（一般为 0.4Ω 左右），电流互感器正常工作时接近短路状态。
- 3) 电流互感器二次绕组不允许开路运行，因为开路运行时，由一次侧电流产生的磁动势得不到二次磁动势的抵消而全部成为励磁磁动势，使电流互感器铁心饱和，在二次侧端子上将出现较高的过电压，对工作人员的安全构成危害，同时高度饱和的铁心也会因铁损过大，发热加剧而损坏互感器的绝缘。因此，电流互感器的二次绕组和外壳都必须可靠接地。

6.1.6.2 高压电压互感器

高压电压互感器装于车顶部，用于监测电力机车行驶过程中接触网电压。机车上普遍应用了 TBY1-25/100 型高压电压互感器。

(1) 技术参数。高压电压互感器技术参数见表 2.3-79。

表 2.3-79 高压互感器技术参数	
参 数	规 格
额定一次电压 (kV)	25
额定二次电压 (V)	100
额定电压比	250
准确级次 (级)	0.5
额定输出 ($\cos\varphi=0.8$) (V·A)	20
误差限值	
电压误差 (%)	0.5
相位差 (′)	20
相数	单相
频率 (Hz)	50
冷却方式	自冷
绝缘等级 (级)	A
功率因数	0.8 (滞后)

(2) 结构。高压电压互感器的主要部件有绕组、铁心、油箱、瓷套、出线装置等，如图 2.3-179 所示。

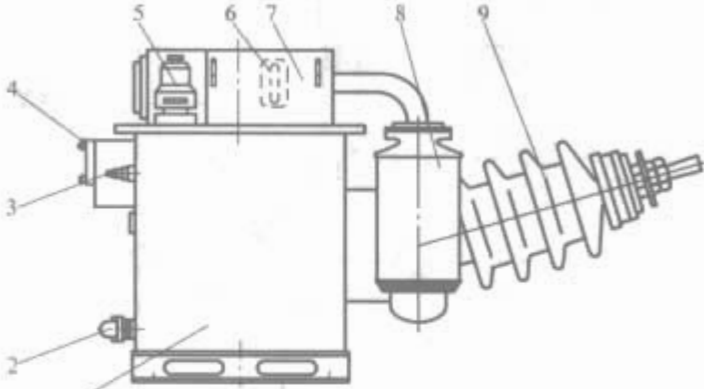


图 2.3-179 高压电压互感器结构图

1—油箱；2—油样活门；3—观察窗；4—二次侧套管；
5—压力释放阀；6—油位表；7—箱盖；8—吸湿器；
9—25kV 套管

绕组放在油箱内，浸于 45 号或 25 号变压器油中。高压一次侧 A 端由高压瓷套引出，低压二次线圈出头 a1、x1 及高压一次绕组 X 端子、接地屏出线端子经 0.2kV 套管引出。互感器油箱外部经过接地螺栓可靠接地，避免由于悬浮电位造成放电现象。箱盖上有油位表，并用红色油漆在显著位置标明 $+40^\circ\text{C}$ 、 $+25^\circ\text{C}$ 、 -25°C 温度下的油位。箱体上有注油装置，箱盖上有补油装置。互感器内装有呼吸器，保证油箱内气压与外界大气压强相等。同时，为了保持因环境温度及油温变化时吸入或排出空气的干燥，呼吸器内装有硅胶。在箱盖上还装有压力释放阀 1 个，其开启压力为 (35 ± 5) kPa，关闭压力为 19kPa，以防止互感器内部短路或其他原因引起互感器爆炸。

1) 一次绕组。组成高压电压互感器一次绕组的线圈为多层圆筒式，呈宝塔状，一次绕组为高压绕组，A 端接高压，X 端接地。

2) 二次绕组。由于高压绕组对低压绕组及地之间存在分布电容，在一次侧发生故障时二次绕组会产生很高的静电感应电压，造成一、二次绕组之间击穿，危及测量仪表或人身安全。为此，在高压一次绕组与低压二次绕组之间设置静电屏。静电屏由一块 0.5mm 厚的紫铜板围成，然后引出一根接地线，与接地端子相连，在油箱外部接地。

3) 铁心。铁心为壳式结构，绕组套装于心柱周围，心柱为梯形结构，外接圆直径为 80mm，有效截面积为 42.4cm^2 。整个铁心通过夹件夹紧，铁心与夹件之间安装接地片。

(3) 工作原理。高压电压互感器是一种专门用作变换电压的特种变压器，利用电磁感应原理工作。电压互感器的主要作用是：给测量仪器、仪表和继电保护、控制装置传递信息，使测量、保护和控制装置与高电压相隔离。

(4) 使用与维护。电压互感器一次绕组连接在车顶 25kV 高压线路上，X 端子接地（轨道电路），二次绕组外部接有测量仪表、保护继电器等设备，为低电压部分。电压互感器的一、二次绕组之间有足够的绝缘，从而保证所有低压回路的车顶高压线路的高电压相隔离。

6.1.7 高压避雷器

高压避雷器安装于机车顶部，主要用于机车的过电压保护。

高压避雷器按照外套差别有瓷套与硅橡胶之分。外套为瓷套的高压避雷器有 Y10W-42/105TD 型无间隙金属氧化物避雷器、Y10WT-42/105TD 型无间隙金属氧化物避雷器；外套为硅橡胶的高压避雷器主要有 Y10WT-42/105TD 型硅橡胶金属氧化物避雷器。

(1) 技术参数。高压避雷器的技术参数见表 2.3-80。

表 2.3-80 高压避雷器技术参数

技术参数	Y10WT-42/105TD 型硅橡胶金属氧化物避雷器	Y10W-42/105TD 型瓷套无间隙金属氧化物避雷器	Y10WT-42/105TD 型瓷套无间隙金属氧化物避雷器
额定电压（有效值）（kV）	42	42	42
标称放电电流（kA）	10	10	10
系统标称电压（有效值）（kV）	27.5	27.5	27.5
系统最大持续运行电压（有效值）（kV）	30	30	30
参考电压（1mA 下）（kV）	≥58	≥58	≥58
工频参考电压（阻性 1mA 下）（kV）	≥56		≥56
持续运行电流（阻性）（μA）	≤300	≤300	≤300
残压（10kA、8/20μs）（kV）	≤105	≤105	≤105
总高（mm）	550±5	550±10	550±10
质量（kg）	10	42	42

(2) 结构。高压避雷器由顶盖、避雷器单元、外套及底板等组成，图 2.3-180 所示为瓷套高压避雷器的基本结构。

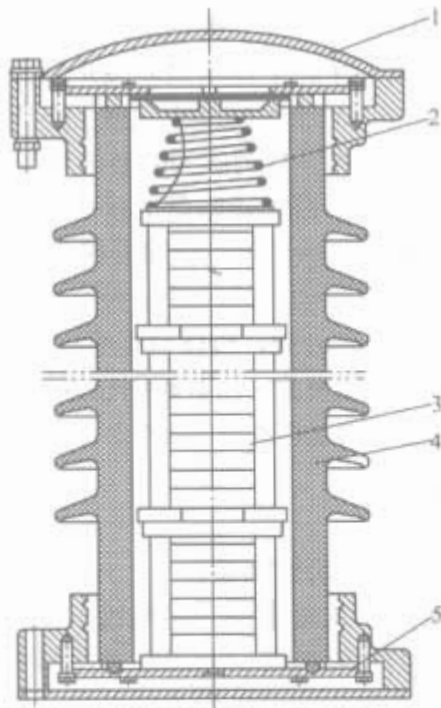


图 2.3-180 瓷套高压避雷器结构图
1—盖板组装；2—弹簧体；3—芯体组装；
4—瓷套；5—底板组装

高压避雷器在结构设计上具有下列特点：

- 1) 防振性。对芯体采取了防振及加固措施，适应于机车运行中振动频繁的工作条件。
- 2) 防污性。在高度比同类型避雷器降低的情况下，能保证爬电距离大于 850mm；在高度与同类型避雷器相同的情况下，能保证爬电距离大于 1000mm。
- 3) 防爆性。采用压力释放结构，保证即使出现意外情况，车顶设备仍将完好并可靠运行。

(3) 工作原理。金属氧化物避雷器的主要元件是氧化锌阀片，而氧化锌阀片由 ZnO 及其他多种金属氧化物在高温下烧结制成，具有相当优异的非线性伏安特性（相当于稳压二极管的反向特性）。

避雷器优异的伏安特性可使其在正常工作电压下呈现高电阻，流过的电流非常小，可视为绝缘体，从而实现无间隙。而当系统上出现超过某一电压动作值的电压时，呈低电阻，电流急剧增加，使避雷器残压被限制在允许值下，从而保护了电力机车电器设备的绝缘。待电压恢复到正常工作范围时，避雷器又呈绝缘状态。因此，避雷器不存在工频续流，无间隙、无续流正是其技术先进性的体现。

避雷器具有下列技术特点：

- 1) 是理想的全天候避雷器，与放电间隙相比，不存在放电电压随气候变化的问题。
 - 2) 适应范围广，与传统避雷器相比，在重污秽地区具有很大的优越性。
 - 3) 阀片荷电率高，保护性能优越。能抑制雷电过电压，而且对操作过电压也有良好的抑制作用。
 - 4) 通流容量大，抗老化能力强，运行寿命长。
 - 5) 无续流，不存在灭弧问题，从而减少了因机车引起的地面变电站不明跳闸故障。
 - 6) 在工频工作电压作用下，避雷器实际上不吸收能量，而对瞬时过电压进行反应和吸收能量，与放电冲击同步发生。
- (4) 使用与维护。避雷器在装箱、开箱、运输、存储和安装时，应避免强烈碰撞及利物刮伤避雷器外壳。避雷器在存储时，周围不应存放强酸、强碱等腐蚀性的气体，以免避雷器受到化学腐蚀。

在使用避雷器的过程中，要始终保持外套干燥、光洁，不许有裂纹。

阀片在长期运行电压作用下存在老化问题，因此，在运行中需加强对避雷器的监测，并定期对其进行预防性试验。

- 1) 测量直流参考电压（ U_{1mA} ）。当流过避雷器电流达到规定的 1mA 时，读取避雷器两端间的电压（此时直流脉动不大于±1.5%），不应小于 58kV。
- 2) 测量直流泄漏电流。对避雷器施加 $0.75U_{1mA}$ ，读取流过避雷器的泄漏电流，其值应不超过 50μA。
- 3) 测量交流参考电压。对避雷器施加 50Hz 工频电压，当流过避雷器的阻性电流为 1mA 时，用 LCD-4 阻性电流仪测量，读取电压的峰值，其值不应小于 56kV。
- 4) 测量持续运行电流。对避雷器施加 50Hz 工频电压 30kV，此时流过避雷器的阻性电流不应超过 300μA。
- 5) 测量绝缘电阻。用 2500V 绝缘电阻表测量，将测量结果和以前的数据进行比较。

6.1.8 轴端接地装置

轴端接地装置安装于转向架轴端，网侧高压经牵引变压器后通过接地线装置流过车轴车轮接入钢轨，形成一个回路，通过安装轴端接地装置能有效地改善机车导电性能，防止轴箱滚动、轴承电蚀，提高车辆的可靠性。

- (1) 技术参数。不同型号的干线电力机车、地铁、大功率交流机车对轴端接地装置的接地电流要求不同，因此，干线电力机车、地铁及大功率交流车轴端接地装置的型号、参数也不同。轴端接地装置主要技术参数、型号及应用车型见表 2.3-81。

表 2.3-81 轴端接地装置主要技术参数、型号及应用车型

技术参数	FrostAB436D FrostAB401D		Schunk	TJD01
	上海地铁车	DJ4	上海地铁车	SS ₃ 系列、SS ₄ 系列、 SS ₅ 系列及 SS ₈ 等电力机车
适用车型	上海地铁车	DJ4	上海地铁车	SS ₃ 系列、SS ₄ 系列、 SS ₅ 系列及 SS ₈ 等电力机车
额定电流 (A)	400	600	400	180
最大电流 (A)	600 (t=60min)	900 (t=5min)	600 (t=60min)	600 (t=5min)
瞬间短路电流 (A)	6000 (t=100ms)	—	6000 (t=100ms)	—
碳刷数量 (个)	2	3	2	1
接触电阻 (mΩ)	≤8	5~20	≤8	≤50
质量 (kg)	11	3.2	11	—
碳刷与接触盘接触面积 (cm ²)	16	24	16	14
保护方式	IP66	—	IP66	—

(2) 结构。轴端接地装置结构如图 2.3-181 所示, 它由端盖、壳体、碳刷、碳刷弹簧、碳刷架、接触盘、绝缘垫及线缆支架等主要部件组成。轴端接地装置通过壳体安装于转向架的轴箱上, 碳刷架与壳体间垫有绝缘垫, 与碳刷接触的接触盘安装于转向架的轴端上。轴端接地装置碳刷架的端部具有线缆安装孔, 地铁接地装置和转向架轴承之间的密封主要是通过多片油封实现。

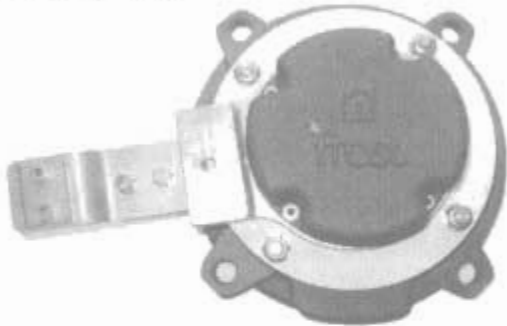


图 2.3-181 上海地铁轴端接地装置

(3) 工作原理。通过 4 个 M16 螺钉把轴端接地装置与转向架轴箱连接。接地装置安装好后, 碳刷与接触盘弹性接触, 保证具有很小的接触电阻, 约为 5~20mΩ。当网侧高压经牵引变压器后通过轴端接地装置碳刷、接触盘、轮对接入钢轨, 形成一个回路。这样能有效地改善机车的导电性能, 防止轴箱滚动、轴承电蚀, 提高车辆的可靠性。

(4) 检修与维护。

1) 拆解前一般检查。检查各紧固件是否有松动, 外表面的镀层、油漆是否有脱落等。还要检查壳体安装凸台是否有裂痕。

2) 拆解后检查。分 3 步进行: ①拆解。拆除电缆固定于接地装置端的 M10×20 螺钉; 拆除接地装置安装于转向架上的 4 个 M16×50 螺栓, 取下接地装置。拆除端盖的 4 个紧固螺栓。②清洁。用干净的干棉布擦除接地装置碳刷及接触盘的污垢。用 0.2~0.3MPa 的压缩空气吹扫各部及用毛刷清扫各部灰尘。③性能检查。目测碳刷的磨损量与刻度线的距离, 磨损不得超过刻度线; 目测接触盘的接触面无油脂, 无清晰的划痕; 目测接触盘、碳刷架、弹簧支撑是否有明显的烧痕; 检查各紧固件是否有松动, 绝缘件是否有裂纹等; 检查绝缘垫两端面密封胶处是否开裂; 检查 O 型密封圈是否老化; 检查壳体各螺套是否有松动现象; 检查碳刷在刷架孔内能否自由拉动, 且碳刷的弹力范围是否在 (32±3.2) N 之内。

6.2 低压电器

6.2.1 主令电器 (司机控制器)

司机控制器是司机用来操纵内燃机车、电力机车、地铁车、动车组运行的控制电器。利用它来控制电路中的低压电器以达到控制主电路中的电气设备的目的, 使司机操作既方便又安全可靠。司机控制器按功能作用可分主司机控制器、辅司机控制器、电空制动控制器 (大闸) 和单独制动控制 (小闸) 4 种。

(1) 技术参数。不同型号的内燃机车、电力机车、地铁车、动车组的电气要求不同, 对应司机控制器闭合表要求输出也不同, 因此司机控制器型号种类较多。

内燃机车、电力机车、地铁车、动车组上装车运行的司机控制器主要技术参数、型号及应用车型见表 2.3-82~表 2.3-85。

表 2.3-82 主司机控制器技术参数、型号及应用车型

型 号	应用车型	额定直 流电压 (V)	约定发热 直流电流 (A)	额定直 流电流 (A)	触点防 护等级	质量 (kg)	机械寿命 (次)	电寿命 (次)
S355	广州、深圳地铁车	110	10	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
S353	武汉地铁车	110	10	1	IP40	≈15	>10 ⁶	>10 ⁵
S352	北京、兰州、三茂动车	110	10	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
S343	内燃、动车组	110	10	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
S336	内燃、动车组	110	10	1	IP40	≈6	>10 ⁶	>10 ⁵
S350	上海地铁二号线车及希腊雅典地铁车	110	10	1	IP40	≈13	>10 ⁶	>10 ⁵
S600	SS ₄ 、SS _{7C} 、SS ₇ 及 SS _{3B}	110	10	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵

续表

型 号	应用车型	额定直 流电压 (V)	约定发热 直流电流 (A)	额定直 流电流 (A)	触点防 护等级	质量 (kg)	机械寿命 (次)	电寿命 (次)
规范化调车	DF ₅ 、DF ₇ 调车机车	110	10	1	IP40	≈7	>10 ⁶	>10 ⁵
规范化干线	DF ₁₁ 、DF _{4D} 、SS _{3B} 、SS ₄ 、SS _{7C} 、SS _{7D} 及 SS ₉ 机车	110	10	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS5B	SS ₁ 机车	110	5	1	IP40	≈12	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS6B	SS ₃ 机车	110	5	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS6E	SS _{3B} 机车	110	5	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS14A	SS ₄ 改、SS _{4B} 、SS _{4C} 、SS _{6B} 机车	110	5	1	IP40	≈11	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS14	SS ₅ 机车	110	5	1	IP40	≈11	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS14B	SS ₈ 、SS ₉ 机车	110	5	1	IP40	≈11	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS14D	TM ₁ 车	110	5	1	IP40	≈11	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS18	200km 动车	110	5	1	IP40	≈8	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS14E	DWA	110	5	1	IP40	≈11	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS25	200km 交流传动机车、“中华之星”	110	5	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS25A	“中原之星”	110	5	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS14F	SS ₉ 机车	110	5	1	IP40	≈11	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS231	新 SS ₉ 改机车	110	5	1	IP40	≈10	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS231A	新 SS ₄ 改机车	110	5	1	IP40	≈10	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS231B	新 SS _{3B} 机车	110	5	1	IP40	≈10	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS35	乌兹别克斯坦车	110	5	1	IP40	≈10	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS25B	哈萨克斯坦车	110	10	1	IP40	≈10	>2×10 ⁶	>10 ⁵
M3919d	DJ ₄	110	10	1	IP60	≈11	>2×10 ⁶	>10 ⁵

表 2.3-83 辅司机控制器技术参数、型号及应用车型

型 号	应用车型	额定直 流电压 (V)	约定发 热电流 (A)	额定 电流 (A)	触点防 护等级	质量 (kg)	机械寿命 (次)	电寿命 (次)
S610	电力机车	110	10	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
规范化干线	DF ₁₁ 、DF _{4D} 、SS _{3B} 、SS ₄ 、SS _{7C} 、SS _{7D} 及 SS ₉ 机车	110	10	1	IP40	≈10	>10 ⁶	>10 ⁵
TKS4A	SS ₁ 机车	110	5	1	IP40	≈6	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS6C	SS ₃ 机车	110	5	1	IP40	≈7	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS6D	SS _{3B} 机车	110	5	1	IP40	≈7	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS15A	SS ₄ 改、SS _{4B} 、SS _{4C} 机车	110	5	1	IP40	≈7	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS15	SS ₅ 机车	110	5	1	IP40	≈7	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS15B	SS ₈ 、SS ₉ 机车	110	5	1	IP40	≈7	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS15D	TM ₁ 车	110	5	1	IP40	≈6	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS15C	SS ₉ 机车	110	5	1	IP40	≈6	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS232	新 SS ₉ 改 机车	110	5	1	IP40	≈5	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS232A	新 SS ₄ 改 机车	110	5	1	IP40	≈5	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS232B	新 SS _{3B} 机车	110	5	1	IP40	≈5	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS36	乌兹别克斯坦车	110	5	1	IP40	≈5	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS36B	哈萨克斯坦车	110	10	1	IP40	≈5	>2×10 ⁶	>10 ⁵

表 2.3-84 电空制动控制器技术参数、型号及应用车型

型 号	应用车型	额定直 流电压 (V)	约定发 热电流 (A)	额定电流 (A)	触点防 护等级	质量 (kg)	机械寿命 (次)	电寿命 (次)
S620	电力机车	110	10	1	IP40	≈6	>10 ⁶	>10 ⁵
规范化干线	SS _{3B} 、SS ₄ 、SS _{7C} 、SS _{7D} 及 SS ₉ 机车	110	10	1	IP40	≈6	>10	>10 ⁵
TKS22A	SS ₄ 改、SS _{4B} 、SS _{4C} 机车	110	5	1	IP40	≈6	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS26	“中原之星”、“中华之星”、新 SS ₉ 改机车	110	5	1	IP40	≈6	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS22C	DJ1 机车	110	5	1	IP40	≈6	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS230	SS ₉ 、新 SS ₄ 改、新 SS _{3B} 机车	110	5	1	IP40	≈6	>2×10 ⁶	>10 ⁵
TKS26B	哈车	110	10	1	IP40	≈6	>2×10 ⁶	>10 ⁵

表 2.3-86 电流继电器主要技术参数

参 数	JL14 系列	TJJ2 系列	JZ15 系列
触头			
数量	2 动合	2 动合 1 动断	8 对桥式
额定电压 (V)	—	DC110	—
额定电流 (A)	5	5	10
开距 (mm)	≥2.5	≥4	≥3
超程 (mm)	≥1.5	1.5	≥2
初压力 (N)	—	0.9	0.7
终压力 (N)	0.25	1.4	0.9
吸引线圈			
额定电压 (V)	—	—	DC110
额定电流 (A)	5 1200	—	—
线径 (mm)	— —	φ0.29	φ0.16
匝数	216 1	4000	13 100
阻值 (Ω)	0.417 ≈0	120	1000
恢复线圈			
线径 (mm)	— —	φ0.12	—
匝数	— —	3000	—
阻值 (Ω)	— —	205	—
整定值	TGJ 为 10A FGJ 为 2800A	ZJDJ 为 18V	—

(2) 结构及工作原理。JL14 系列继电器磁系统由角板形的磁轭、固定在磁轭上的圆形铁心及平行形衔铁组成。衔铁绕磁轭棱角支点转动而成拍合式动作。磁系统上部衔铁一端装有反作用弹簧，继电器不通电时，借助反作用弹簧的弹力使衔铁打开，同样也利用改变弹簧压力大小来调节继电器动作电流整定值。在磁系统下部装有触头组，与衔铁支撑件连接，并由衔铁带动触头开闭。在铁心端部衔铁上装有非磁性垫片，利用调整非磁性垫片的厚度来调节继电器的释放电流值，即调整返回系数。

6.2.2.2 风道继电器

风道继电器安装在牵引电动机、制动电阻柜的通风系统风道上，用来反应各处的通风状况。

(1) 技术参数。风道继电器的技术参数见表 2.3-87。

表 2.3-87 风道继电器技术参数

名 称	触头数量	触头额定电流 (A)	触头额定电压 (V)	风压整定值 (Pa)	外形尺寸 (mm)	质量 (kg)
TJY5A-0.3/11 型静压式风道继电器	1 动合	3	DC 110	294×(1±10%)	φ140×78	0.75

(2) 结构及工作原理。TJY5A-0.3/11 型静压式风道继电器为正风压型机械式继电器。其工作原理为：风机启动后，各风道内产生的静压值达 294×(1±10%)Pa 时，膜片动作，带动动触头克服反力弹簧的作用，使动合触头闭合，接通相应的控制电路正常工作；当通风系统发生故障，风道内无风压或风压低于 294Pa 时，动触头在反力弹簧及膜片的作用下恢复到原位，动合触头打开，从而切断相应的控制电路。

6.2.2.3 劈相机起动继电器

根据劈相机的起动要求，劈相机在起动时应投入起动电阻后方能起动，当劈相机起动完成后必须切除起动电阻。劈

相机起动继电器的作用就是当劈相机起动到最大转矩对应的转速点以后切除起动电阻，其型号有 TJQ2S、TJQ1 等。

(1) 技术参数。动作值 $U_{CN}/U_{AB}=0.9\pm0.1$ 。

(2) 结构。SS₉ 型电力机车使用的劈相机起动继电器 (283AK) 是一个电子装置，其框图如图 2.3-186 所示。

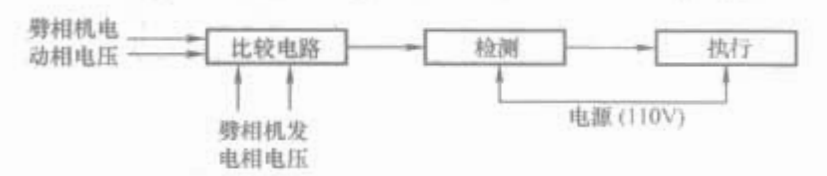


图 2.3-186 劈相机继电器框图

(3) 工作原理。由于劈相机转速是一个非电量，而劈相机发电相电压与转速有关，故可以通过 TJQ2S 检测劈相机发电相电压与电动相电压的比值来间接测定劈相机转速。同时发电相电压的增长快慢与电网电压有关，因此，劈相机起动继电器的动作时间不是固定的。

劈相机起动继电器有 2 个输入信号，一个是电网电压，另一个是劈相机发电相电压。2 个输入电压经过整流后用直流电压进行比较，其差值输出给检测电路。检测电路检测到该差值近似于 0 时，检测电路即翻转输出一高电位去触发执行电路，使中间继电器动作，其动断触点断开，切除起动电阻接触器。

6.2.2.4 中间继电器

中间继电器在控制电路中作为逻辑传递的一个环节元件，用于增加信号数量，量值放大以及开闭逻辑状态转换。电力机车上使用的型号主要为 JZ15 系列，其技术参数见表 2.3-86。

JZ15 系列继电器为直动式立体布置结构。其磁系统采用螺管直动式，铁心和线圈布置在继电器中央，8 对双断点桥式触头分别布置在磁轭两侧。为了获得较平坦的吸力特性和足够的开距，铁心采用锥形止铁。继电器的反力特性依靠触头支架上的一对拉伸弹簧调节，衔铁上还装有一个手动按钮，以供检查及故障操作使用。

JZ15 系列继电器触头系统采用永磁钢吹弧以提高触头直流分断能力。小型化的永磁钢嵌在静触头的下部，采用无极性布置法，可以将直流电弧拉长，实现吹弧目的。

6.2.2.5 风压继电器

风压继电器一般用作电阻制动和空气制动间的安全联锁或是主断路器的气路保护，主要型号有 TJY3B-1.5/11、TJY3A-4.5/11 和 TJY3-1.5/11 等。

(1) 技术参数。风压继电器的主要技术参数见表 2.3-88。

表 2.3-88 风压继电器主要技术参数

技术参数	TJY3 型	TJY3A 型	TJY3B 型
触头类型	桥式双断点	桥式双断点	桥式双断点
触头数量	1 动合, 1 动断	1 动合, 1 动断	1 动合, 1 动断
触头额定直流电压 (V)	110	110	110
触头额定电流 (A)	5	5	5
额定气压 (kPa)	900	900	900
触头接通风压 (kPa)	150	450 ⁺¹⁵ ₀	150
触头开端风压 (kPa)	100±10	100 ⁺²⁵ ₀	100±10

(2) 结构。风压继电器结构如图 2.3-187 所示。

(3) 工作原理。TJY3B-1.5/11 型风压继电器用作电阻制动和空气制动之间的安全联锁。在电阻制动工况下，由于

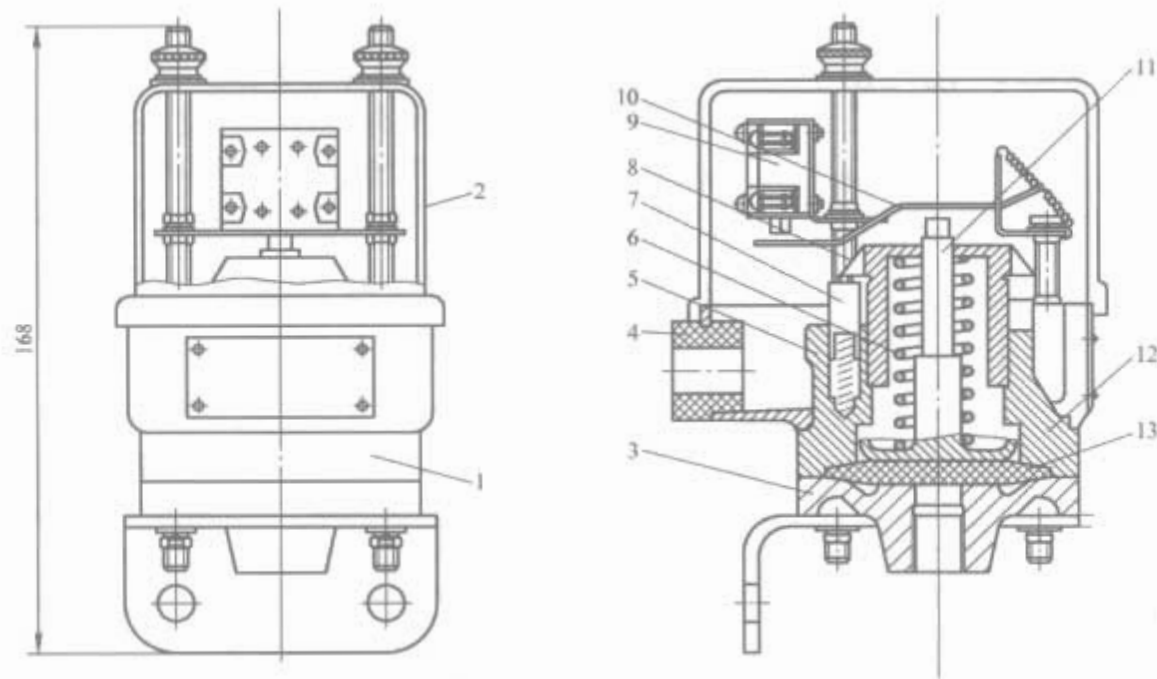


图 2.3-187 风压继电器结构

1—壳体；2—上盖；3—下盖；4—橡皮环；5—弹簧；6—弹簧；7—止销；8—调节螺母；
9—行程开关；10—支架组装；11—活塞；12—阀体；13—橡胶薄膜

机车运行需要同时使用空气制动补充时，要绝对防止机车轮周制动力过大，造成车轮抱死滑行而擦伤。当司机操作空气制动补充制动缸压力达到 150kPa 时，被视为补充制动力过大，风压继电器动作，自动切除电阻制动的励磁电流，解除电制动力。只有当制动缸压力下降返回到 100kPa 时，继电器恢复，方可再次投入电阻制动。TJY3A-4.5/11 型风压继电器用作主断路器的气路保护。当主断路器储风缸压力超过 450kPa 时，风压继电器动作，触头闭合，接通主断路器合闸电路，主断路器方能合闸，避免主断路器在低气压下合闸，从而无法保证可靠分闸的危险。

6.2.2.6 接地继电器

接地继电器主要用于主电路接地保护，电力机车上多采用 TJJ2 系列接地继电器。

(1) 技术参数。TJJ2 系列接地继电器的主要技术参数见表 2.3-86。

(2) 结构。TJJ2 系列接地继电器主要由电磁系统、触头系统、指示器、接线端子及有机玻璃罩等组成，组装在酚醛玻璃纤维压制成的底板上，如图 2.3-188 所示。

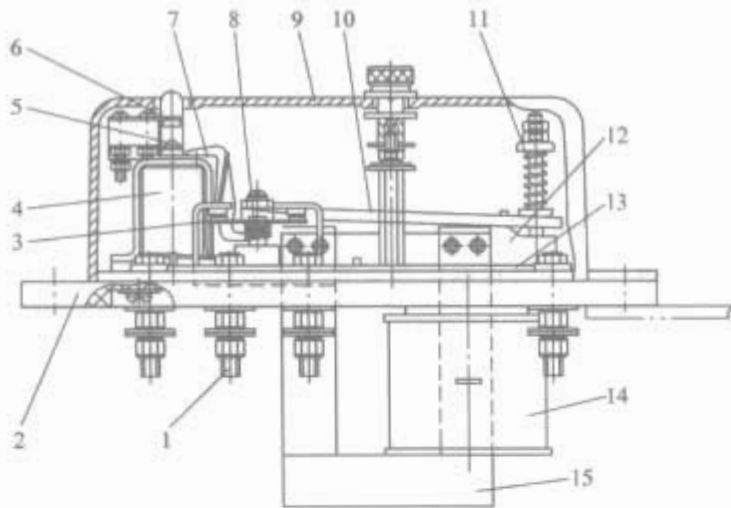


图 2.3-188 接地继电器结构图

1—接地端子；2—底板；3—主触头；4—恢复线圈；
5—联锁触头；6—指示器；7—钩子；8—扭簧；9—外罩；10—衔铁；11—反力弹簧；12—支座；13—非磁性垫片；14—吸引线圈；15—铁心

TJJ2 系列继电器的磁系统为拍合式并带有吸引线圈，指示器带有恢复线圈及螺管式磁路。有两对主触头和一对联

锁触头，都为桥式双断点。主触头由衔铁控制，联锁触头由指示杆带动。

(3) 工作原理。正常工作状态，红色指示杆埋在罩内，继电器处于无电释放状态。一旦发生接地故障时，在电磁吸力的作用下，衔铁被吸合，其主触头进行分合转换，开闭有关控制电路，使主断路器分断，从而达到保护的目的。与此同时，衔铁压下钩子 7 的尾部，迫使其转开，使红色指示杆脱扣并在弹簧作用下跳出外罩，显示动作信号。这是一种机械式信号，同时联锁头也随之闭合，在司机台上显示相应的信号。

故障消失后，衔铁在反力弹簧作用下返回。但此时红色指示杆未能回复到罩内，司机台上的信号也未能熄灭。只有通过主断路器“合”按钮的恢复电路环节，使恢复线圈切断时得电，将指示杆吸入，联锁触头断开，继电器才能恢复正常状态。

6.2.3 开关电器

6.2.3.1 电空接触器

电空接触器主要用于铁道干线机车直流和交流主电路牵引工况和制动工况构成电路时电路的接通与分断，或者用于励磁电路，也可用于其他相似负荷的电力拖动电路中。

电空接触器根据使用的电路不同可分为直流电空接触器和交流电空接触器；根据结构可以分为无灭弧装置电空接触器和有灭弧装置电空接触器；根据用途可以分为线路电空接触器、磁削电空接触器和励磁电空接触器。

电空接触器的特点：通断迅速，灭弧能力强，机械寿命长。

(1) 技术参数。当前在铁道干线机车上装车运行的电空接触器主要有 TCK1、TCK7 系列，其具体型号及主要技术参数见表 2.3-89。

(2) 结构。TCK7 系列电空接触器结构如图 2.3-189 所示，主要由电空阀、气缸、绝缘杆、动静触头及其弧角、吹弧装置、灭弧罩、联锁装置、软联线等部件组装而成。电空接触器的导电部分和传动气缸通过绝缘杆连接后与两块侧面板组成一个整体。灭弧罩是由 DMC 塑料压制而成的灭弧块通过螺杆紧固而成。吹弧线圈由吹弧线圈、静触头座和上引线座焊接而成。在吹弧线圈中装以铁心，线圈两端用侧板夹紧，就组成了电空接触器的吹弧系统。

表 2.3-89 电空接触器技术参数

主要技术参数	TCK1		TCK7							
	TCK1-400/220	TCK1-400/1500	TCK7-600/1500	TCK7A-800/1500	TCK7B-600/1500	TCK7C-600/1500	TCK7D-600/1500	TCK7E-600/1500	TCK7F-1000/1500	TCK7G-1000/660
主电路										
额定电压 (V)	DC 220	DC 1500	DC 1500	DC 1500	DC 1500	DC 1500	DC 1500	DC 1500	DC 1500	AC 660
额定电流 (A)	400	400	600	800	600	600	600	600	1000	1000
主触头开距 (mm)	4~6	4~6	18~22	18~22	18~22	18~22	18~22	18~22	19~23	19~23
主触头压力 (N)	62±10	62±10	160~200	160~200	160~200	160~200	160~200	157~196	196~275	196~275
主触头超程 (mm)	≥2	≥2	9~14	9~14	9~14	9~14	9~14	9~14	7~14	7~14
接触线长 (mm)	≥20	≥20	≥25	≥25	≥25	≥25	≥25	≥25	≥31	≥25
动静触头偏移量 (mm)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
气压传动										
额定工作气压 (kPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
最小工作气压 (kPa)	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375
传动气缸行程 (mm)	22~24	22~24	22~24	22~24	22~24	22~24	22~24	22~24	22~24	22~24
辅助联锁										
直流额定电压 (V)	20	110	110	110	110	110	110	110	110	110
额定电流 (A)	5	5	15	15	15	15	15	15	20	15
接点数 (个)	2	2	4	4	4	6	4	4	4	4
电空阀										
直流额定电压 (V)	—	—	110	—	110	110	110	110	110	110
最小工作电压 (V)	—	—	77	—	77	77	77	77	77	77
耐压试验										
主电路对地 (V)	5750	5750	5750	5750	5750	5750	5750	5750	5750	3650
动、静触头之间 (V)	1500	1500	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800	3000
辅助回路对地 (V)	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500

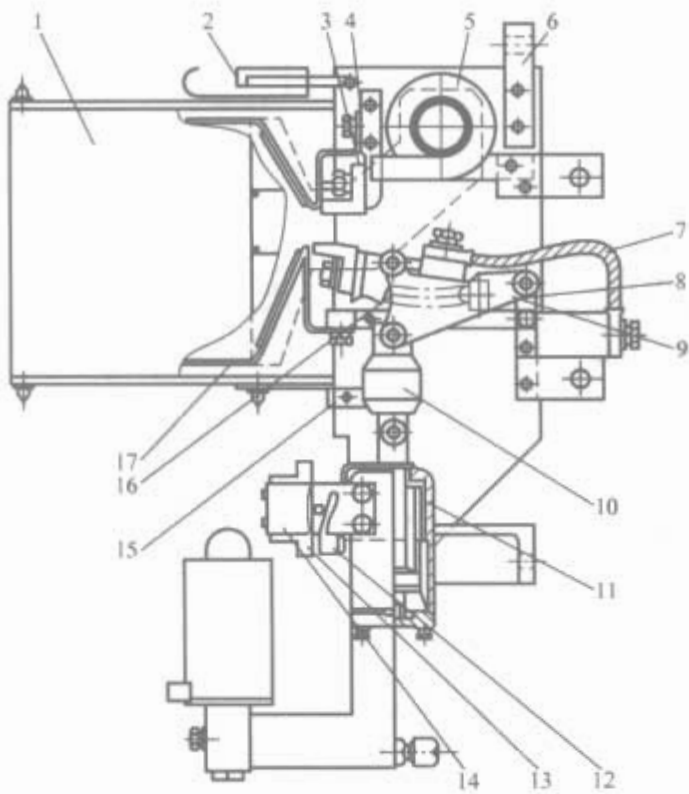


图 2.3-189 电空接触器结构原理图
1—灭弧罩；2—挂钩；3—静触头；4—静触头弧角；
5—吹弧线圈；6—安装杆；7—软连线；8—出线座；
9—杠杆组；10—绝缘杆；11—气缸；12—联锁板；
13—联锁开关；14—联锁支架；15—灭弧罩基板；
16—动触头弹簧；17—动触头弧角

(3) 工作原理。电空接触器通过控制电空阀得电，使电空阀门打开，压缩空气进入传动气缸，克服返回弹簧的作用，推动活塞杆、绝缘杆、触头杠杆支架向上运动，使动、静触头闭合。当电空阀失电时，在气缸返回弹簧的作用下使触头分断。当触头带电分断时，在吹弧线圈的帮助下，电弧经动静触头弧角引入灭弧室，使电弧熄灭，电路安全分断。

灭弧室为横缝多圈电弧灭弧室，由多层灭弧板叠装而成。电弧由动静触头弧角引入灭弧室后，经灭弧室内分弧角分别送进各个横缝中，此时电弧在灭弧室内呈多圈螺旋式。取灭弧板时，只需把挂钩拉开，让灭弧室往前倾倒下来就可取走。

(4) 检修与维护。经常保持电空接触器的清洁，特别是绝缘杆、绝缘板的清洁，对不易去净的污垢可以用蘸酒精的布擦拭干净。各活动部件应能自由活动，在气缸内应定期注入机油，气缸传动部分不应有动作卡滞或漏气现象，否则应拆洗检查。应定期清洗气缸，清洗后注入二硫化钼合成锂基润滑脂。触头表面被电弧烧毛而影响接触时应进行整修，当触头磨损到银焊片厚度只剩下 1.5mm 时应进行更换。软连线折损面积大于原形的 10% 时应进行更换。触头弹簧上出现电弧烧痕或变形时进行更换。灭弧室（罩）用砂布打磨灭弧板上电弧烧痕，锉修引弧角上烧痕。有裂纹及严重缺损的或壁板厚小于原形 1/2 的灭弧室（罩）应更新；灭弧室距接地点的距离应不小于 150mm。

各绝缘零件表面被电弧烧损时应将碳化层清理干净，并涂环氧气干漆 1504 漆。维护时注意紧固松动的紧固件。

吹弧线圈在经受大短路电流时会产生拼紧现象，应将它分开。吹弧线圈表面绝缘漆脱落时应补漆。联锁触头系统不许有剥离及过量牢固；滚轮转动及杠杆滑动应灵活；弹簧作用良好，不许有断裂；触头不许有烧痕，厚度不应小于原形的 1/3，接触良好，有适当开距及超程。存放时应将气缸进风口、加油孔与电空阀排气孔堵死，防止灰尘及脏物进入，定期在气缸内注入机油并使之动作几次。电空接触器应存储在清洁、干燥的地方，长期存放后使用时应清洗各部件。

表 2.3-90		二位置转换开关主要技术参数			
参 数	TKH3-500/1500	TKH4-840/1000	TKH4A-970/1000	TKH10-840/1020	
额定电压 (V)	DC 1500	DC 1000	DC 1000	DC 1020	
额定电流 (A)	DC 500	DC 840	DC 970	DC 840	
主触指单个终压力 (N)	34~44	39~49	39~49	39~49	
主触指接触线长度 (mm)	≥14	≥14	≥14	≥14	
主触指超程 (mm)	2~3	2~3	2~3	2~3	
联锁触头额定电压 (V)	DC 110	DC 110	DC 110	DC 110	
联锁触头额定电流 (A)	DC 10	DC 10	DC 10	DC 10	
传动气缸额定风压 (kPa)	490	490	490	490	
最低工作风压 (kPa)	368	368	368	368	
气缸活塞杆行程 (mm)	44±1	44±1	44±1	44±1	

(2) 结构。
1) 骨架。如图 2.3-190 所示，骨架由底板、面板、支柱及套在支柱上的环氧玻璃布管等组成。底板和面板上焊角钢，用于安装触指杆（静触头组）。尼龙轴套用于安装牵引制动鼓及反向鼓。两个转鼓由连接板组合在一起。

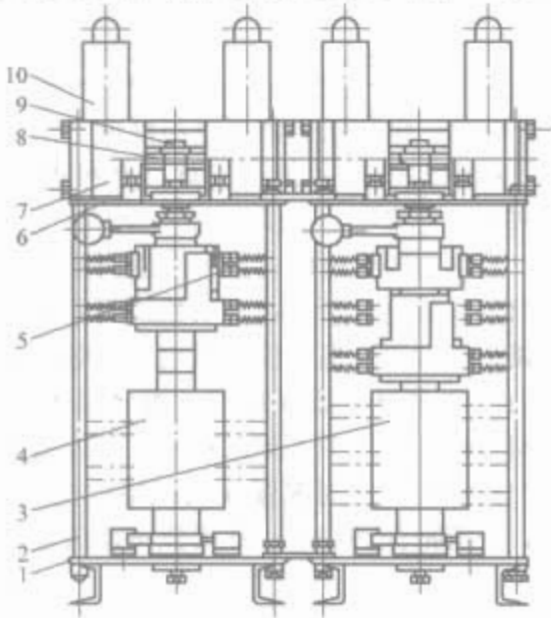


图 2.3-190 TKH10-840/1020 型转换开关结构图
1—底板；2—支柱；3—牵引制转鼓；4—反向鼓；
5—触指杆；6—面板；7—传动气缸；8—拨叉；
9—销；10—电空阀

2) 转鼓。转鼓也称转换开关的动触头组。转鼓为反向鼓和牵引制动鼓的合称。两转鼓结构形式基本相同，仅触片组装在转轴上的安装排列位置及绝缘垫圈长度有区别，如图 2.3-191 所示。

转轴由方钢制成。凸轮用于控制联锁触头的开闭。触片（动触头）形状相似，仅有左、右之分，它们的大小由于通过的额定电流不同而不同。触片（动触片）与绝缘垫圈间隔地套装于转轴上。绝缘垫圈使触片（动触头）之间保持绝缘，使开关能安全可靠地工作。绝缘垫圈长度由额定电压等

6.2.3.2 二位置转换开关
二位置转换开关用来转换接通机车主电路：一是改变机车的运行方向；二是实现机车由牵引工况转换为制动工况。二位置转换开关也称反向器。
(1) 技术参数。目前在铁路干线电力机车上装车运行的二位置转换开关主要有 TKH3-500/1500 型、TKH4-840/1000 型、TKH4A-970/1000 型和 TKH10-840/1020 型等。其主要技术参数见表 2.3-90。

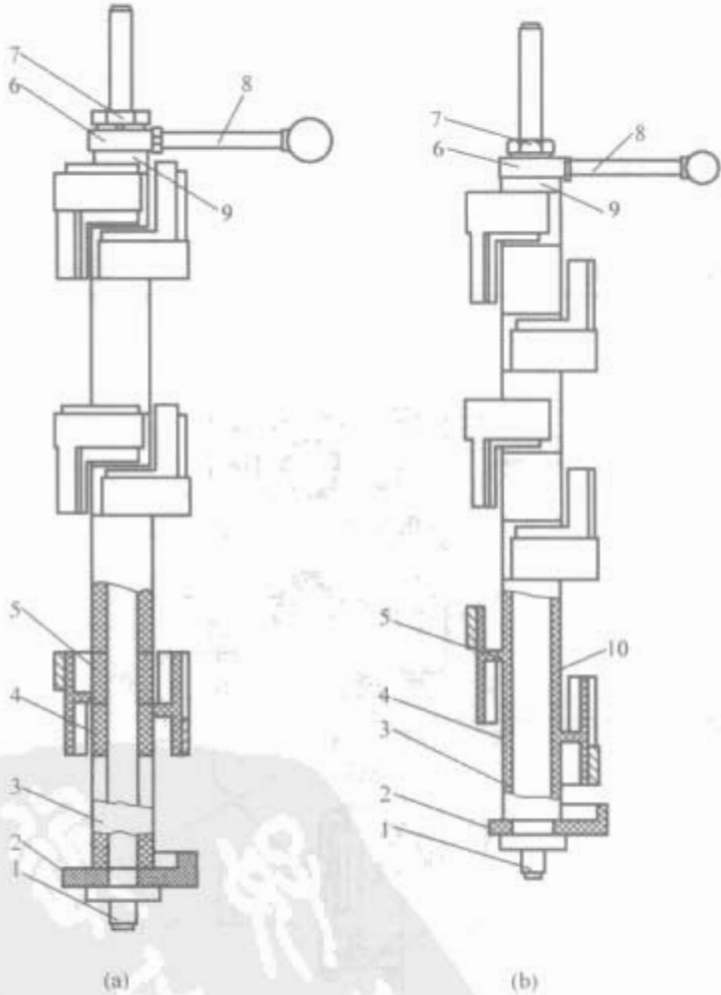


图 2.3-191 反向鼓及牵引制转鼓外形结构
(a) 反向鼓；(b) 牵引制转鼓
1—转轴；2—凸轮；3、10—长短不同的绝缘垫圈；
4、5—触片（动触头）；6—手柄座；7—压紧螺母；
8—手柄；9—转动鼓

级决定。触片（动触头）结构如图 2.3-192 所示。
转换开关采用转鼓形式是根据电接触理论设计的。电器开关触头接触有面接触、点接触和线接触三种基本形式。在该种电流等级下，一般选用线接触形式。在该种压力下，线

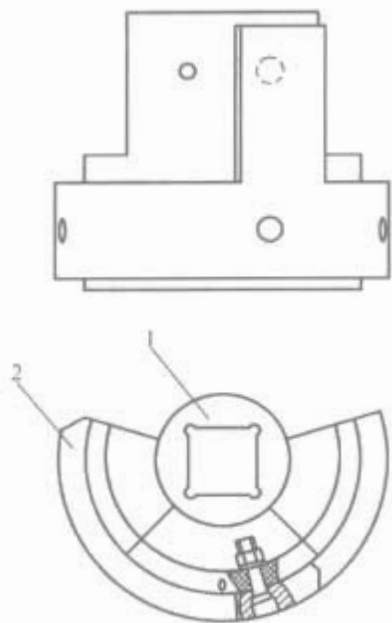


图 2.3-192 触片（动触头）组装
1—胶木座；2—触片

接触接触电阻小，有利于控制温升。同时，采用转鼓触片可以增强触头的传热散热效果及防止触头产生氧化膜，利于控制电器的温升。

3) 转鼓触指杆（静触头组）。转鼓触指杆由一块环氧玻璃布板上安装若干组触指杆装配而成，如图 2.3-193 所示。

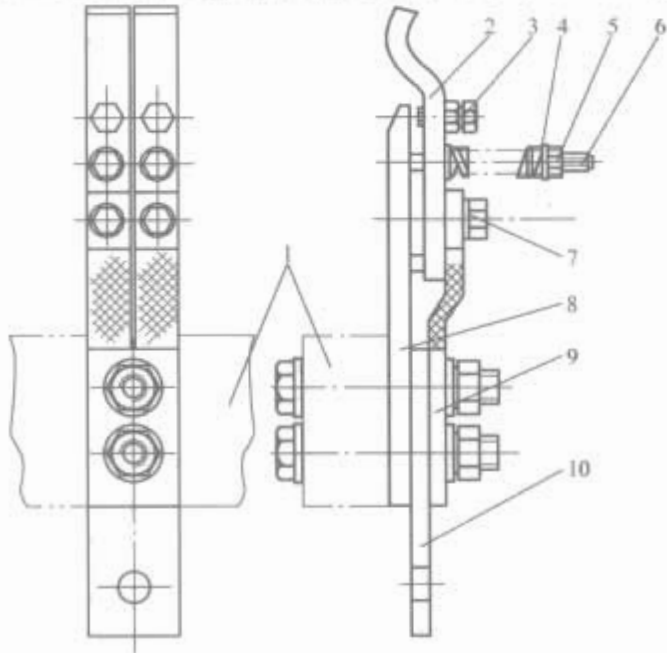


图 2.3-193 触指杆结构
1—环氧玻璃布板；2—触指杆；3—调整螺栓；
4—弹簧；5、6—螺杆、螺母；7—螺栓；
8—触指座；9—软连接；10—接线板

触指与转鼓触片间的压力通过旋动螺母调节。触指超程通过调整螺栓调节。接线板对外与主电路相连接。

4) 传动气缸。传动气缸如图 2.3-194 所示。它有 2 个工作气缸，但不同时工作。气缸上装有电空阀，这是转换开关的传动系统。安装电空阀前，必须进行气缸的气密性试验。

5) 联锁触头。联锁触头位于底板上，由有机玻璃外壳、推杆、滚轮、弹簧及封闭在外壳内的桥式触头组成。通过透明的有机玻璃外壳可以观察触头的开闭情况。联锁触头用来开断和闭合控制电路中的相应触头。

(3) 工作原理。机车起动前，首先应确保机车行驶方向与位置转换开关所处位置一致。若不一致，应通过司机手柄操纵转换开关换向手柄，使电空阀得电动作，气路打开推动活塞杆作直线运动及转鼓作旋转运动，机车主电路相应转换，从而保持了开关与机车运行方向的一致。“制动”、“牵

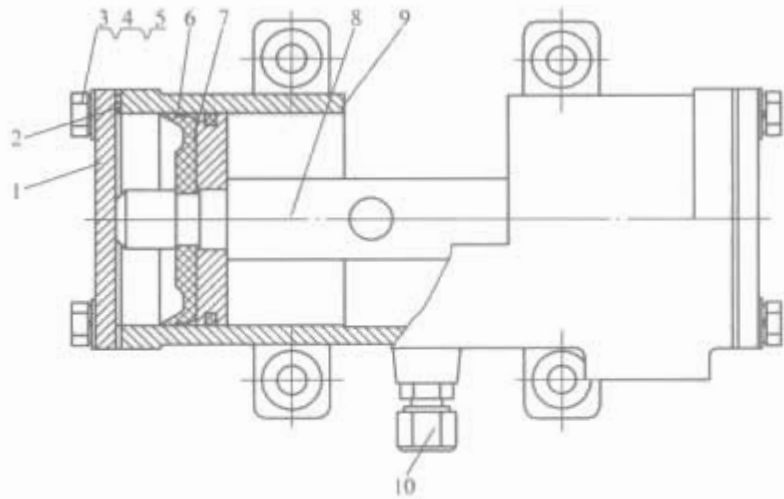


图 2.3-194 传动气缸结构
1—气缸盖；2—密封垫；3、4、5—螺栓、螺母及垫圈；
6—皮碗；7—活塞；8—活塞杆；9—气缸体；10—管接头

引”位的相互转换也通过同样的方式进行。开关转换完成时，联锁触头同时转换，开断和闭合控制电路中相应的联锁触头。

位置转换开关只能在机车速度为零时转换，否则会造成转换开关严重烧损，机车牵引电动机产生环火甚至烧损，机车轮缘擦伤。

(4) 维护与检修。二位置转换开关的检修分为辅修、小修和中修。辅修为一般性检查。小修、中修一般按照解体前检查、解体、解体后检查、部件组装和总组装后检查试验的程序进行。

1) 解体前检查项目有一定风压下转鼓动作情况及各处密封情况，尼龙轴套与转轴的旷动量，牵引制动鼓在牵引位、反向鼓在向前位时触指与触片的相对位置以及风缸行程等。

2) 解体检修和部件组装按以下程序进行：

①传动风缸。取下缸盖，汽油清洗风缸。检查风管接头螺纹应完好，缸壁无拉伤，活塞杆、圆柱销无裂损。组装时，风缸各必要处涂覆适量润滑油脂加强密封。调整密封圈厚度保证风缸行程符合规定。装电空阀后作通风试验，活塞动作应灵活无卡滞，管路密封良好。

②转鼓与触指组件。检查触头表面状态，清除触头烧痕。动静触头接触位置正确。触头厚度、压力、超程及接触线长度符合规定。绝缘板无烧损及过热变质。编织线折损面积不超过原形的 10%。保证接线正确、牢固，标记清晰，动触片及胶木座不松动，转鼓外径符合限度规定，传动风缸的勾贝及皮环完好。

③盖板。汽油清洗盖板，更新磨损过量的尼龙轴套，检查支柱绝缘套管无裂损烧痕。

④低压控制部分。汽油清洗各部。打磨触点烧痕，触点表面光洁。检查安装板、推杆滑块无裂纹损伤。测量辅助联锁超行程。检查联锁动作灵活无卡滞及与外罩不相碰。

3) 总组装后的检查试验应符合例行试验要求，包括主触头的检查试验，转鼓动作性能试验，风缸、电空阀、风管路泄漏试验，绝缘性能试验，工频耐受电压试验等。

7 辅助电气设备

机车或动车组辅助电气设备是为机车或动车组牵引及制动系统等提供保障的设备，包括辅助电源、压缩机、空调机、通风机、冷却系统及其驱动电动机等。它的质量直接关

系到机车能否正常运行。

对于早期的辅助系统，内燃机车采用机械传动或液力传动；电力机车多采用电动—发电机组或旋转劈相机向辅助电动机供电。这类系统（传动）技术较简单，也较成熟，但存在着体积大、质量大、效率低、噪声大、维护工作量大、不能节能运行等诸多缺点。对于交—直—交电力机车上应用最多的劈相机供电的辅助系统，还存在着三相输出电压不平衡且随输入电压变化的缺点，这对辅助电动机的运用不利。

采用交流传动方式的辅助系统具有三相输出电压稳定、平衡、节能降噪、维护工作量小、系统总体质量小的优点。发达国家的机车或动车组辅助系统目前已普遍采用交流传动方式，该传动方式已成机车辅助系统的发展趋势。采用交流传动方式辅助系统的核心是静止变流器，通常称辅助变流器。

7.1 辅助变流器

7.1.1 对辅助变流器的要求

- (1) 在国家有关标准规定的输入电压范围内具备正常工作的能力。具体对我国电力机车而言，即在 17.5~31kV 范围内。其辅助变流器输出的电压及频率应能满足包括空压机、油泵、风机等负载的正常工作能力。
- (2) 除具备变压变频输出能力外，还应具备允许空压机等负载在辅助变流器工作时直接起动及切除的能力，以满足空压机等负载频繁启停的要求。
- (3) 具备适应恶劣环境的工作能力及高可靠性，以满足机车或动车组在各种环境下正常运行的要求。
- (4) 考虑一定的冗余度，以尽可能避免机车或动车组因辅助变流器的原因而发生运行途中停车等重大事故。当然，故障冗余设计应从辅助系统的角度来整体考虑。

7.1.2 功能

简单地说，辅助变流器的功能就是为车上辅助电气设备供电。相对于主变流器，它所起的作用虽然不同，体积功率也较小，但电路结构完整，功能齐全。以单相工频交流供电的电力机车为例，其辅助变流器包括输入侧变流器、中间直流环节、输出侧变流器及相关控制电路等几大部分，其单台容量一般在几十千伏安至几百千伏安之间，属典型的中小功率交—直—交变流器。

7.1.3 分类

辅助变流器的种类多样，可以多种形式划分。辅助变流器的设计一般均采用模块化设计，通常按功能方式划分，如整流器模块、逆变器模块、控制电路模块等。这种方式较直观，而且辅助变流器的单台容量大多数在 35~400kVA 范围内。在这种容量等级下以功能划分方式进行模块化设计，可使辅助变流器的空间利用较充分，模块数量也较少。这样，既可达到模块化、简统化的目的，又可兼顾实现体积质量小、设备布置紧凑、安装维护工作量小、成本较低的目标。根据机车或动车组上应用的变流器目前均为电压型这一情况，以不同环节的稳压方式来划分，辅助变流器可分为输入侧变流器稳压控制型和输出侧变流器直接稳压控制型两大类。

7.1.4 输入侧变流器稳压控制型

7.1.4.1 特点及构成

此类辅助变流器主要包括输入侧变流器、中间直流环节、输出侧变流器等几大部分。此类辅助变流器的特点是输入侧变流器和输出侧变流器均为可控型，并通过对输入侧变

流器的控制实现中间直流环节电压的稳定。上述交流供电的电力机车辅助变流器即属于此类型，其构成示意如图 2.3-195 所示。

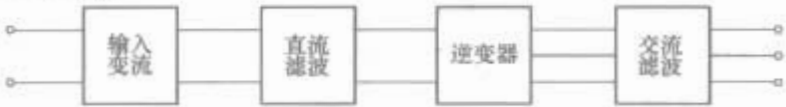


图 2.3-195 输入侧变流器稳压控制型构成示意

电力机车或动车组辅助变流器的输入一般有以下方式：交流供电的可取自其牵引变压器的辅助绕组，直流供电的可直接从电网取电。为适应多电压制式供电要求，采用从牵引变流器中间直流环节取电的方式，这种方式，在多电压制式供电的情况下，可以简化辅助变流器的电路，此时辅助变流器的电路通常采用斩波器加逆变器的构成方式。辅助变流器也可放置在主变流器的柜体中，从而尽可能地降低成本。

7.1.4.2 分类

此类辅助变流器，其输出侧变流器大多采用最为简单的二电平电压型逆变电路，而其输入侧变流器则有多种电路形式，比较典型的主要包括四象限变流器电路、相控桥式整流电路、斩波器电路、高频逆变电路等。这类变流器在交流输入条件下应用很多，在直流输入条件下，斩波器电路、高频逆变电路等在目前也有较多的应用。

当输入电压为交流电压时，使用整流器作为输入端变流器，将变化较大的交流电压转换成稳定的直流电压。整流器电路主要有两种，一种是相控桥式整流电路，另一种是四象限变流电路。相控桥式整流电路开发较早，应用时间较长，它的特点是属于降压整流方式，要求输入电压高于输出电压，控制简单，技术成熟，造价较低，但它的输入侧功率因数较低，对电网的影响较大，控制响应速度也较慢。四象限变流电路技术是为解决相控桥式整流电路存在的问题而发展起来的技术，它将升压斩波与整流电路结合起来，并运用锁相环技术跟踪识别基波相位，使输入电流近似正弦波并与网压同相，其特点是属于升压整流方式，要求输入电压低于输出电压，其输入侧功率因数较高，接近于 1，达到了对电网“友好”的目标；采用 IGBT 作为其功率器件后，调制频率提高，因而控制响应速度加快，当其输入端或输出端发生变化时，控制系统能很快作出响应，快速调节使输出保持稳定。

四象限变流器、斩波器等在主变流器中已作了较多的介绍，而在辅助变流器中的应用也是相似的，其原理如图 2.3-196 所示。对于相控桥式整流电路，在辅助变流器的应用中，主要是半控桥式整流电路，其原理如图 2.3-197 所示。



图 2.3-196 含四象限变流器的辅助变流器电路示意



图 2.3-197 应用相控桥式整流电路的辅助变流器电路示意

对于相控桥式整流器的参数选择举例如下。

设逆变器在 50Hz 运行时输出为方波，由此求得的中
间直流环节电压为

$$U_{dc} = \left(\frac{\pi}{\sqrt{6}} \times 380\right) V = 487V \tag{2.3-209}$$

留有一定电压余量，取 $U_{dc}=500V$ 。

设整流部分的功率因数为 0.82，逆变器损耗 P_L 为
2kW，可求得中间直流环节的功率为

$$P_d = S \times 0.82 + P_L = 84kW \tag{2.3-210}$$

式中：S 为整流器的视在功率。

取 P_d 为 85kW，中间直流环节的额定电流为

$$I_d = \frac{P_d}{U_{dc}} = \left(\frac{85\,000}{500}\right) A = 170A \tag{2.3-211}$$

设中间直流环节最大电流 I_{dmax} 为 205A，整流电压 U_{dc}
的计算公式为

$$U_{dc} = 0.9KU_N \frac{1 + \cos\alpha}{2} \tag{2.3-212}$$

式中：K 为交流辅助绕组在额定负载时的降压系数，取
 $K=0.9$ ； U_N 为交流输入电压有效值； α 为延时触发控制角。

当 U_N 变化范围为 650~1000V 时， $U_{dc}=500V$ ，可求
得 $\alpha=25.9^\circ\sim76.4^\circ$ 。考虑到换向角的影响取 $\alpha=16^\circ\sim72^\circ$ ，
可求得晶闸管及二极管的导通角分别为

$$\beta_T = 180 - \alpha, \text{ 得 } \beta_{Tmax} = 164^\circ, \beta_{Tmin} = 108^\circ$$

$$\beta_D = 360 - \beta_T, \text{ 得 } \beta_{Dmax} = 252^\circ, \beta_{Dmin} = 196^\circ$$

晶闸管元件参数的选择。晶闸管的反向峰值电压 U_{RRM}
应满足式 (2.3-213)，即

$$U_{RRM} \sqrt{2} KU_{Nmax} \tag{2.3-213}$$

式中：K 为安全系数，取 $K=2.5$ ； U_{Nmax} 为最高辅助绕组电
压，取 $U_{Nmax}=1000V$ ，得 $U_{RRM}=3600V$ 。

对于高频逆变电路，实际是 DC-AC-DC，即先逆变再整
流，其逆变部分工作频率一般在 10kHz 以上，在逆变与整
流部分之间有变压器，其作用一是改变电压，二是实现输入
与输出的隔离。由于其工作频率高，因此体积和质量小，非
常适宜对体积质量要求较高的场合；但器件较多，成本较
高。其原理图如图 2.3-198 所示。

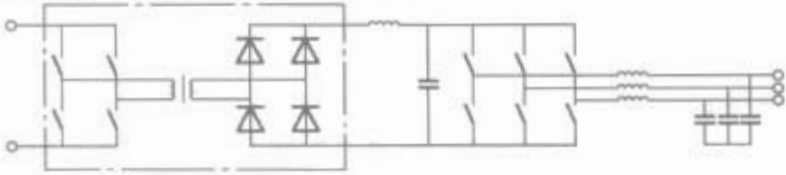


图 2.3-198 应用高频逆变电路的
辅助变流器电路示意

7.1.5 中间直流环节

中间直流环节主要包括电感和电容，四象限变流器部分
的参数选择与主变流器中的类似；而对半控桥式整流电路，
其参数选择如下。

7.1.5.1 滤波电抗器

设额定输入电压为交流 860V，中间直流环节电压为
500V，要求选取的电感值在额定的条件下，电流不超过预
定的波动，电抗器的电压波形如图 2.3-199 所示。

在 $\alpha-\gamma$ 区间电抗器商的伏秒积分为

$$\int U dt = \frac{1}{\omega} \int_{\alpha}^{\gamma} (0.9 \times 860 \times \sqrt{2} \sin\alpha - 500) d\alpha = 2.17V \cdot s$$

电流脉动量设 $\Delta I_x=100A$ ，则

$$L = \frac{\int U dt}{\Delta I_x} = \left(\frac{2.17}{100} \times 10^3\right) mH = 21.7mH$$

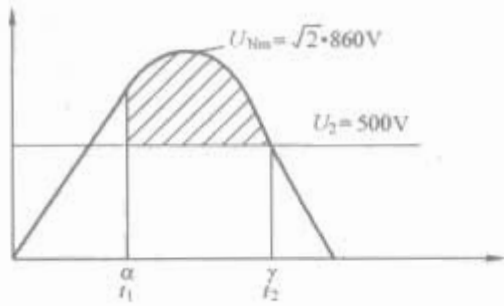


图 2.3-199 滤波电抗器的电压波形

式中：取电抗器的参数为 $L=24mH$ ， $f=100Hz$ ， $I=170A$ 。

7.1.5.2 滤波电容器

中间直流环节电压额定值为 500V，考虑到整流的过渡
过程中，电动机能量反馈引起中间直流环节电压的升高，取
电容器的额定电压值为 700V，把两个 350V 的电解电容
串联。

仅考虑整流引起的电流脉动，电容器上的电流波形简化
如图 2.3-200 所示。

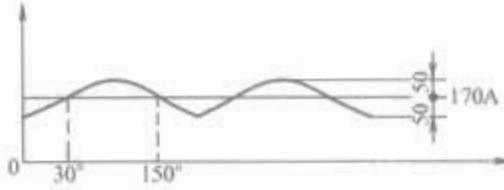


图 2.3-200 滤波电容的电流波形简化

当电流波动时，电容器上的电压波动 ΔU 不应大于
10V，电流波动引起的电量变化为

$$\Delta Q = \int i dt = \frac{1}{\omega} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (100 \sin\alpha - 50) d\alpha = 0.218C$$

则
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \left(\frac{0.218}{10}\right) mF = 21.8mF$$

考虑逆变器侧对电容电压的影响，取 $C=24mF$ ，则每
个电容器参数为 $6000\mu F/350V$ ，采取 2 串 8 并的方式连接。

7.1.6 输出侧变流器直接稳压型

此类辅助变流器与输入侧变流器稳压控制型相比，其输
入侧变流器或没有，或只是不可控整流桥，而控制的重点是
逆变器，所用的电路有二电平逆变、三电平逆变、多重逆
变、十二脉冲逆变等多种形式。

7.1.6.1 二电平逆变器的特点

二电平逆变器由于电路结构简单，器件少，可靠性高，
应用最为广泛。作为机车或动车组的辅助变流器，其输出方
式既可以选择变压变频 (VVVF) 方式，也可以选择恒压恒
频 (CVCF) 方式，以满足不同负载的需要，其参数计算与
选择方法与主变流器相似。

现代逆变器的特点是采用 IGBT 及无吸收电路。过去逆
变器采用的功率器件有普通晶闸管、GTO、晶体管等，IG-
BT 技术是近年来逐渐发展成熟起来的。由于 IGBT 具有工
作频率高、自我保护能力强、控制较简单的优点，现在逆变
器采用的电力半导体器件主要是 IGBT。由于采用了 IGBT，
逆变器内部电路结构也发生了变化，这主要体现在电力半导
体器件的过电压保护方面。这方面最早采用有较高损耗的
R-C-D 阻容型过电压吸收电路，发展到后来采用有较低损耗
的不对称型过电压吸收电路及 Δ 型过电压吸收电路，再到
现在的无吸收电路型。无吸收电路型通过采用无感复合母排
技术、低感电容技术尽可能地消除产生过电压的因素，从而
尽可能地避免了过电压情况的发生，同时也消除了吸收电路
所产生的损耗。这样，既简化了电路结构，又降低了逆变器
的损耗，提高了效率，同时还因逆变器发热量的降低使逆变
器的体积质量也得以减小。

7.1.6.2 十二脉冲逆变器

如图 2.3-201 所示，十二脉冲逆变器主要由逆变桥和输出变压器两部分组成。逆变桥部分由两个结构一样的三相逆变桥组成。两个逆变桥由波形相同但有 30° 相位差的脉冲控制，从而使两个输出变压器上的波形也有 30° 的相位差。Dy 型变压器 T1 和 Dz 型变压器 T2 的一次侧都是三角形连接，T2 的二次侧采用“之”字形连接，然后与 T1 的二次侧串联输出。

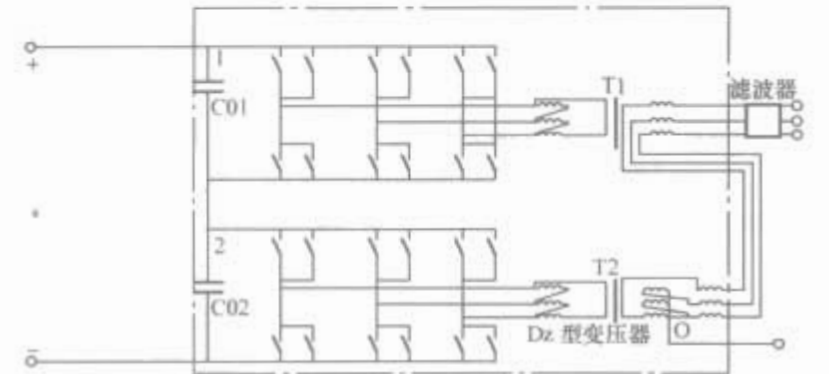


图 2.3-201 十二脉冲逆变器

6 个电压输出相对于直流负端都具有相同的波形，都是周期为 T 、幅度为 0 或电压为 2 的周期波。这些周期波含有不连续谐波。两个输出变压器都具有同样的额定容量和电压变比，因此，T1 的二次绕组匝数应为 T2 的二次单绕组匝数的 $\sqrt{3}$ 倍。其开关频率只为基波的 3 倍，其输出变压器同时也可作为输出滤波器的电抗器，以获得优良的正弦波输出。其优点是开关频率低，IGBT 损耗小，对 IGBT 电压等级要求低。但由于需要两个逆变器与输出变压器，存在电路结构复杂、开关元件数量多、输出变压器复杂、质量较大的缺点。

7.1.7 滤波器

辅助变流器的输出端一般配有滤波器，以适应辅助电动机等的要求。滤波器有两种：一为 du/dt 滤波器，另一为正弦波滤波器。选择什么样的输出波形，则配相应的滤波器。其参数由 LC 滤波器的谐振频率和特征阻抗决定。谐振频率定义为

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.3-214}$$

式中，通常 $nf_1 \leq f_n \ll f_c$ (n 为系数， f_1 为逆变器输出基波频率， f_c 为逆变器的开关频率)。

现代辅助变流器追求的目标是在满足机车需要的前提下，为用户提供良好的人机界面以方便操作，不断提高自动化水平并通过模块化、简统化的设计简化设备的维护维修以降低成本。对辅助变流器性能指标的选择应从辅助系统的角度来考虑进行。只有对辅助系统中包括辅助变流器、辅助电动机、低压电器在内的各个部分的性能、体积质量、成本等因素综合考虑并加以选择，才能既体现出采用交流传动方式辅助系统的优势，又做到辅助系统整体有一个相对较低的成本，真正实现辅助系统的优化。

对变流器输出电压波形的选择是正弦波形还是 PWM 波形，不仅要考虑输出电压波形对辅助电动机的损耗、散热及绝缘的影响，还应考虑与之相应的辅助变流器和辅助电动机的综合成本以及其总的体积质量等方面的因素。采用变流器输出正弦电压波形方案时，对电动机的要求较低，但变流器需要加装正弦波滤波器，相应地，其体积、质量、成本均要增加。采用变流器输出 PWM 电压波形方案时，变流器只需加装小体积的 du/dt 滤波器，不需要加装正弦波滤波器；虽

然对电动机在绝缘、散热等方面的要求相对高一些，但实现这些要求的技术已较成熟，且因此增加的成本比变流器加装正弦波滤波器所增加的成本要低得多，对电机体积、质量的影响也不大。因而与正弦波形方案相比，PWM 波形方案实际在辅助变流器和辅助电动机的总的体积、质量及成本几方面均有优势。从辅助系统的角度考虑，选择变流器输出 PWM 电压波形方案则相对更优。西欧国家目前机车的辅助变流器主要采用这一方案。

采用变流器输出 PWM 电压波形方案时，按照有关标准，要求变流器输出电压的 $du/dt = 500V/\mu s$ ，且电动机最好与逆变器进行匹配设计，使之在启动、运行的状态平稳，也使逆变器运行更为可靠；电动机调整范围广，恒力矩启动，启动电流冲击小，可恒功率运行，节能，有效抑制高次谐波和防止 du/dt 对电机绝缘的冲击，降低由逆变器脉宽调制 (PWM) 引起的电磁噪声。

7.1.8 控制系统的作用及特点

辅助变流器的控制系统按功能可分为整流控制、逆变控制、外围接口及管理几个部分。整流控制部分与整流器模块配合共同完成输入整流任务；逆变控制部分与逆变器模块配合共同完成逆变器输出任务；外围接口及管理则包括故障诊断、系统管理、计算机通信接口及 I/O 接口等部分，完成接收指令、发送信息、协调内部及外部关系的任务。

辅助变流器控制系统的特点是计算机化、网络化。过去，辅助变流器的控制系统硬件多采用模拟电路和数字电路，随着计算机技术的发展，现在辅助变流器均以 16 位微机或 32 位微机为基本平台搭建控制系统，而且用多个微机分别完成不同的功能，将各计算机之间的“主、从”关系划分好，确立好接口并通过网络连接保持信息畅通，从而充分发挥计算机的优势。

现代计算机技术的突飞猛进，为控制系统的发展提供了良好的软硬件平台，其强大功能也使控制方式日新月异。以逆变器控制为例，已从过去的矩形波控制发展到现在的 SPWM 波控制、磁链跟踪控制、矢量控制、直接转矩控制等多种方式，这使得辅助变流器性能越来越优化，适应性越来越好。

7.1.9 辅助变流器举例

我国自 20 世纪 90 年代起就不断设计采用交流辅助传动用的辅助变流器，用于交—直流机车和交—直—交机车。TGF11 型辅助变流器就是其中之一，在 SS_{7E} 电力机车和出口到哈萨克斯坦的交流传动机车上应用。

7.1.9.1 结构与原理

TGF 型辅助变流器采用两整两逆形式，每台机车安装 2 台 TGF11 型辅助变流柜，每柜装有两台四象限变流器和两台逆变器。一台四象限变流器与一台逆变器构成一套 100kVA 独立电源辅助变流器。机车辅助变流器总容量为 400kVA。每个柜的两台四象限变流器共用一个牵引变压器辅助绕组，4 台电抗器。其原理图见图 2.3-202。

一套辅助变流器故障时，经过负载转换处理可满足机车仍可正常运行，两套辅助变流器故障时可降功运行。

7.1.9.2 特点

TGF11 型辅助变流器（见图 2.3-202）具有下列特点：

- (1) 在交—直变流部分采用四象限变流技术，具有网侧功率因数高，适应范围广，蓄能部件体积小等特点。
- (2) 在直—交变流部分采用二电平逆变技术和电压上升率及峰值电压抑制技术，具有功率器件少，可靠性高，三相输出电压对称稳定等特性，对负载影响小。

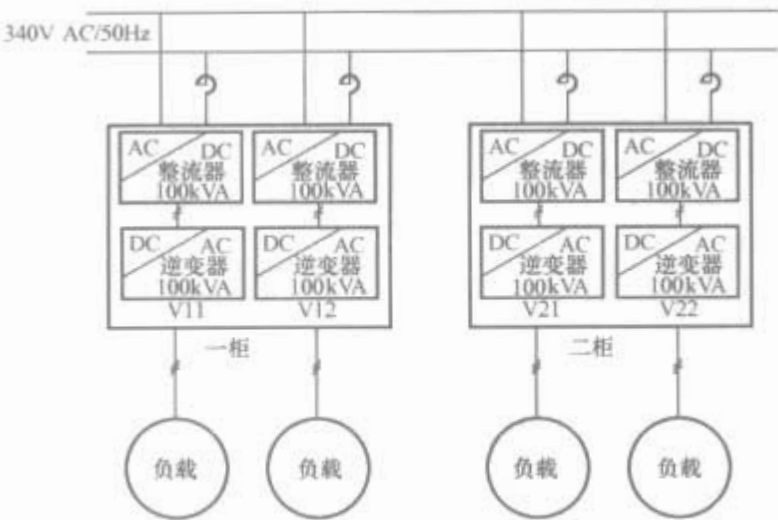


图 2.3-202 TGF11 型辅助变流器

- (3) 采用模块化设计，便于安装及维护。
- (4) 具有完善的保护措施。
- (5) 网络通信接口可扩展。
- (6) 采用强迫风冷及柜内自循环，功率器件及控制装置可靠性高。

7.1.9.3 主要技术参数

TGF11 型辅助变流器的主要技术参数见表 2.3-91。

表 2.3-91 TGF11 型辅助变流器的主要技术参数	
参 数	指 标
交流输入额定电压 (V)	340 ^{+24%} _{-30%}
频率 (Hz)	50±1
输入侧功率因数	>0.9
额定视在功率 (kVA)	1000×2
输出电压	
基波有效值 (V)	
恒压恒频时	380 ^{+5%} _{-10%}
变压变频时	(190~380) ^{+5%} _{-10%}
基波电压频率 (Hz)	
恒压恒频时	50±1
变压变频时	25±1~50±1
电压基波有效值对称性 (V)	±5
波形	SPWM 波
电压上升率 (V/μs)	≤500
电机输入端最大尖峰值 (V)	≤1000
变流器控制	
直流额定输入电压 (V)	110
直流最低输入电压 (V)	77
直流最高输入电压 (V)	137.5
冷却方式	强迫风冷
效率 (%)	>90

7.1.10 试验

7.1.10.1 试验项目

试验的目的是对变流器的性能进行验证，以确保变流器能满足要求。试验主要依据相关标准进行，如 IEC61287、EN50121-1 等，主要包括电气性能、绝缘、温度环境、振动环境和电磁兼容等几大项。主要试验项目见表 2.3-92。

表 2.3-92 试验项目		
试 验 项 目	例行试验	型式试验
目检	△	△
尺寸和公差	—	△
称重	—	△
标志	△	△
绝缘试验	△	△
性能试验	△	△
输出特性试验	△	△

续表		
试 验 项 目	例行试验	型式试验
输入过电压保护试验	△	△
输入欠电压保护试验	△	△
输出过电流保护试验	△	△
输出缺相保护试验	△	△
指示检查	△	△
效率测量	—	△
负载突变试验	—	△
负载中断试验	—	△
短路试验	—	△
噪声测量	—	△
温升试验	—	△
散热器过热保护试验	—	△
低温试验	—	△
湿热试验	—	△
振动和冲击试验	—	△
电磁兼容试验	—	△
输入电源传导骚扰测量	—	△
电磁辐射骚扰测量	—	△
电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	—	△

注 表中“△”表示需要做。

7.1.10.2 试验系统

试验系统通常包括电源、保护电器、测试电路、负载以及被试变流器等，图 2.3-203 所示为常规的交流供电辅助变流器试验系统构成示意。图中 Q1 为隔离用刀开关，QF 为空气断路器，其功能为对输入电源过电流保护。T1 为电源变压器，其功能为对被试辅助变流器提供所需的输入电压。K1~K3 为接触器，其功能为对输入端电源和输出端负载进行投切控制。TA1~TA4 为电流互感器，TV1~TV2 为电压互感器，其功能为对输入电压、电流或输出电压、电流进行测量。

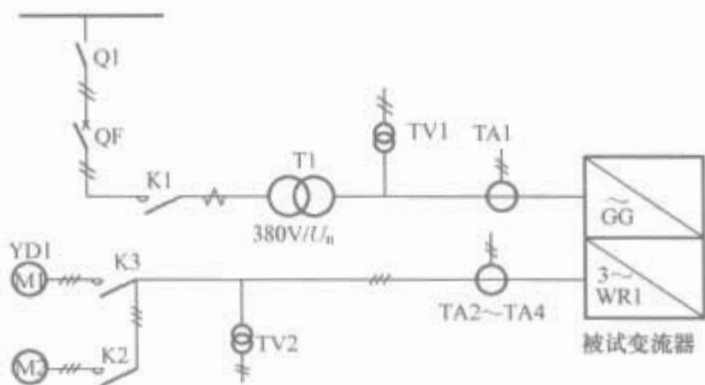


图 2.3-203 交流供电辅助变流器试验系统构成示意

7.2 辅助电动机

7.2.1 供电特征

机车上辅助电动机供电有两种逆变器：一种输出方式为变压变频（VVVF），另一种输出方式为恒压恒频（CVCF），逆变器输出的波形一般为 PWM 波，它通过机车长电缆连接到电动机的输入端，如图 2.3-204 所示。



图 2.3-204 逆变器驱动原理

一台逆变器可供电给一台电动机（如频繁起动的压缩机电动机），也可同时供电给几台电动机（如风机电动机）。如

果一台逆变器供电给一台电动机，则电动机可以变频变压启动；如果一台逆变器供电给多台电动机，则当第 1 台电动机启动之后延时几秒，再启动第 2 台电动机，这时，第 2 台及以后启动的电动机将是全压启动，启动电流是电动机额定电流的 7 倍左右。

逆变器输出的电压为周期性的脉宽调制波，电流为含有丰富高次谐波的非正弦波。逆变器的输出波形如图 2.3-205 所示。由于逆变器的供电特性，电动机的工作条件发生了很大的变化。

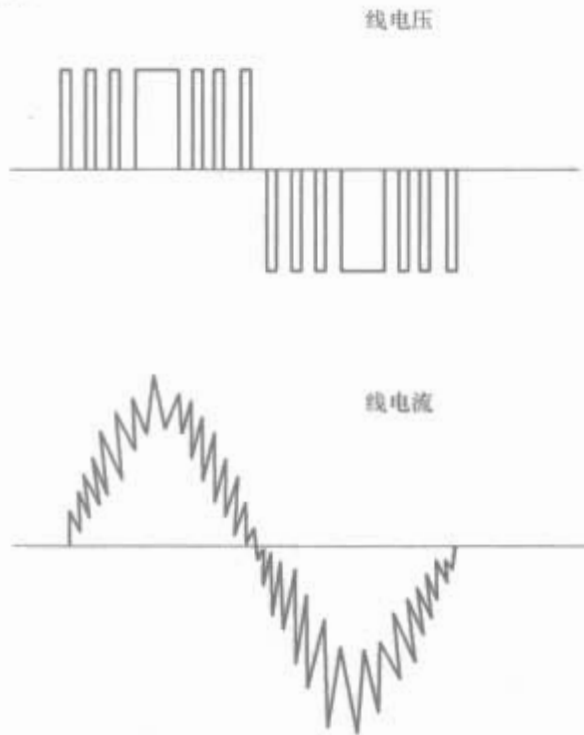


图 2.3-205 逆变器的输出波形

逆变器按 V/f 恒定进行控制，电机在启动过程中磁通基本保持恒定，当频率从 1Hz 左右迅速地增加时，电压迅速上升。当力矩克服负载阻力矩上升成功，负载开始加速，产生比额定负载力矩稍大的力矩，电机运行在额定状态，在这期间，电机从 0 加速到额定转速，电机启动电流一直维持在额定电流附近，没有冲击，有较宽的恒力矩调速范围，称之为软启动，如图 2.3-206 所示。软启动改善了辅助电动机的启动环境。

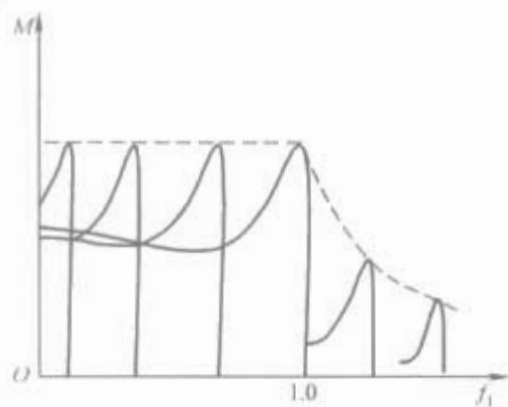


图 2.3-206 启动特性

采用变频调速技术，例如风机，其负载的转矩与转速的平方成正比，节能效果十分显著。

与此同时，由于逆变器输出的非正弦波形，给辅助电机带来新的电磁现象和机械现象，因此，必须了解其原因，设计时加以考虑，并采取相应的防范措施。

电压反射现象在辅助变流器供电系统中的存在，辅助电动机设计时要认真考虑。逆变器用 IGBT 高速开关的关断控制整流后的直流电压波形，其开关频率可达 20kHz，开关速度可达纳秒级，电压上升率 (dV/dt) 可达 10 000V/ μs ，产生的开关重复浪涌电压（尖峰电压）直接影响电机的绝缘

寿命。逆变器用高速开关的关断控制整流后的直流电压波形，此时产生的开关浪涌电压包含有直流成分以外的尖峰电压，如图 2.3-207 所示。

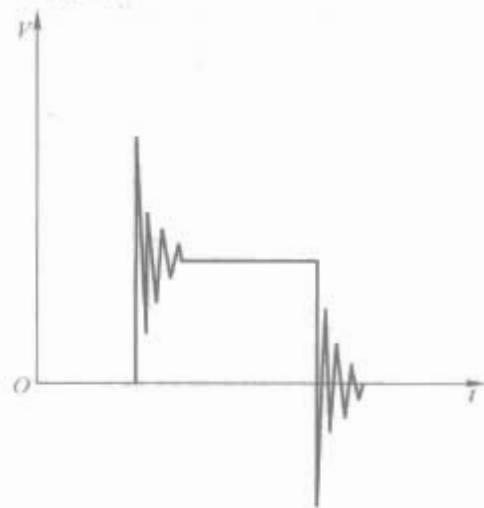


图 2.3-207 逆变器的尖峰电压波形

逆变器产生的尖峰电压传输到电缆中，由于长电缆存在漏电感及耦合电容，逆变器的波反射通过电缆传输到电机时，在电缆两端产生传播与反射。设电缆的波阻抗为 Z_1 ，电机的波阻抗为 Z_2 ，电机的波阻抗比电缆的波阻抗大得多（一般是 10 : 1 ~ 20 : 1），当假定电缆为理想电缆，其损耗可忽略时，电缆的波阻抗 Z_1 为

$$Z_1 = \sqrt{L_c/C_c} \tag{2.3-215}$$

波反射系数

$$\gamma_1 = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \tag{2.3-216}$$

然而，在高频时由于中间直流环节电容的作用，逆变器输出的波阻抗非常低，逆变器波反射系数 $\gamma_{inv} \approx -1$ （负的波反射），电机端的尖峰电压 U_p 达到峰值

$$U_p = (1 + \gamma_1)U_{dc} \tag{2.3-217}$$

式中： U_{dc} 为中间直流环节的电压。

U_p 几乎是中间直流环节电压值的 2 倍，且波振荡频率 f 为

$$f = 1/4t_p \tag{2.3-218}$$

$$t_p = l_c/v_p$$

$$v_p = 1/\sqrt{L'_c C_c}$$

式中： t_p 为波传播时间； l_c 为电缆长度； v_p 为波传播速度； L'_c 为电缆电感； C_c 为电缆电容。

例如，采用低压三相 PVC 绝缘护套电缆线，其参数为 $L'_c = 0.8\mu H/m$ ， $C_c = 0.05\mu F/m$ ，得电缆阻抗 $Z_1 = 125\Omega$ ，波传播速度 $v_p = 150 \times 10^6 m/s$ 。这几乎是真空中光速的一半。

当电压脉冲非常陡，或者电缆非常长时，在线路中将出现全波反射。如果电压脉冲很短，前一个脉冲波还未关断，第二个脉冲波已经开通，此时 f 频率振荡的前次开关的电压瞬变尚未消失，反射到电机端子上的电压可达到 $3U_{dc}$ 。

若逆变器输出电压的开通时间足够长，浪涌电压在电缆中的传播情况如图 2.3-208 所示。图中阴影线高度表示电压值，逆变器端的入射波前沿后面的电压值通常等于中间直流环节电压 U_{dc} 。电动机端在 $1T_k$ 后是全反射，到下一个反射波到达时电压值为 U_{dc} 的 2 倍。在 $2T_k$ 后，下一个反射波在逆变器端是负的全反射，行波峰值为 $-U_{dc}$ 。一旦电动机端电压为 0，这个电压波在 $2T_k$ 后在电动机端为正的全反射。4 T_k 后，逆变器端附近电缆上所有各处的电压为 0，同最初的情况一样。

当陡峭的尖峰电压前沿进入电机时，绕组匝间的分布电

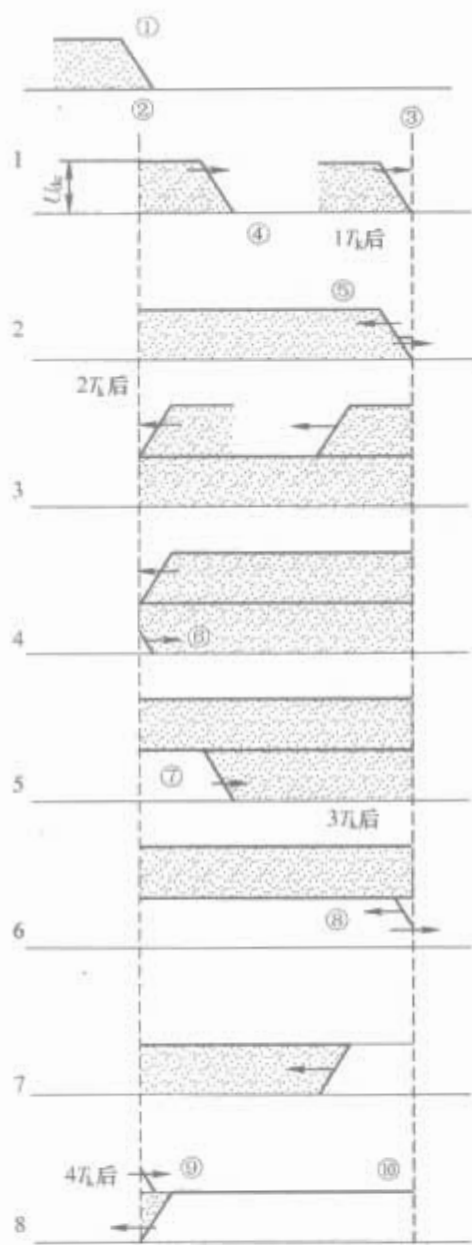


图 2.3-208 浪涌电压传播情况

- ①—浪涌电压的入射；②—逆变器端；③—电机端；
④—正的电压传播；⑤—正的全反射；⑥—负的全反射；⑦—负电压传播；⑧—正的全反射；⑨—负的全反射；⑩—回到情况①

容和对地电容使电压呈非线性分布。

由于脉冲上升时间短，与接线端子相连的线圈产生的电压应力要比以后的线圈强得多，在电机绕组的相与相之间产生冲击和高频振动，在绕组匝间和相间导致局部放电，从而导致绝缘破坏和老化。

试验证明：尖峰电压使电机绕组承受的相间电压是工频电源的2倍，对地电压可达到工频电源的26倍，匝间电压是工频电源的10倍以上。这10倍以上的电压是加在第一匝线圈上的。

在逆变器输出电压中，有一系列高次谐波电压，这些高次谐波电压在电机中产生高次谐波电流，在定、转子中产生附加高频损耗，使电机温升升高。随着电机温度的升高，绕组绝缘发生局部放电的临界电压值会降低，对绝缘材料的破坏就会加速。

7.2.2 电机的设计特点

采用 IGBT 的 400V 级 PWM 逆变器，除系统的匹配外，还应考虑 IGBT 元件特有的开关频率高、上升时间快、尖峰电压引起的局部放电这三个主要因素综合在一起而导致的绝缘破坏。目前，在机车上匹配的辅助逆变器有：

(1) 逆变器的开关频率为 750Hz，中间直流环节电压为 600V，逆变器输出的尖峰电压峰值小于或等于 1000V，电压上升率 $dV/dt \leq 500V/\mu s$ 。

(2) 逆变器的开关频率为 20kHz，中间直流环节电压为

600~650V，逆变器输出的尖峰电压峰值小于或等于 1000V，电压上升率 $dV/dt \leq 5000V/\mu s$ 。

(3) 逆变器的开关频率为 20kHz，中间直流环节电压为 830V，逆变器输出的尖峰电压峰值小于或等于 1500V，电压上升率 $dV/dt \leq 2000V/\mu s$ 。

在设计电动机时应主要考虑以下几个问题：

7.2.2.1 电动机与逆变器的匹配

根据逆变器的供电特点、负载类型和调速范围决定电动机的参数。逆变器设计者应向电动机设计者提供特性曲线，如在整个应用范围内，逆变器输出的电压（包括重复峰值电压）、电压变化率、电流、基波频率、谐波的值。电动机设计者也要向逆变器设计者提供电动机的特性曲线。

电机有 3 种运行方式：

(1) 额定电压、额定供电运行。逆变器输出的电压为恒定值，频率不可调。逆变器的容量 $P=3U_e I_e$ ，电动机按持续工况设计。

(2) 逆变器带 2 台以上的电动机运行。第 1 台电动机按低频低压起动，第 2 台延时起动，这时电压已升至一较高的电压值，第 2 台电动机的起动电流大于第 1 台。起动完成之后，电动机在额定电压运行或调频调速运行。如果其中一台电动机需要重新起动，那么，起动电流是额定电流的 7 倍左右。逆变器应按最大起动电流时的容量考虑，电动机按持续工况设计。

(3) 调频调速的电动机运行。电动机按恒功率、恒电压运行。在整个功率段，逆变器的输出功率按电动机的转矩要求确定，逆变器的容量由输出的电压和恒功率段电流的乘积决定，即 $P=3U_1 I_1$ 。电动机的容量应保证最大频率下仍有一定的过载能力，即在整个调速范围内电动机的容量都是富裕的，见图 2.3-209。

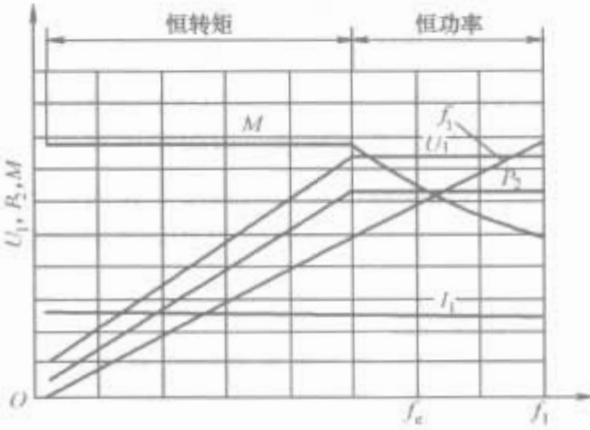


图 2.3-209 恒转矩—恒功率特性

7.2.2.2 线路电缆长度

从图 2.3-207 所示的行波在电机端子上的变化可以看出：波传播时间 t_p 如果小于脉冲上升时间 t_0 ，在电机端子上产生的尖峰波峰值可达到 2 倍的中间直流环节电压值。一般当电缆长度小于 15m 时，在电机端子上产生的电压幅值为

$$U_p(t_p) = t_p U_{dc} \gamma_1 / t_0 \tag{2.3-219}$$

但当电缆长度小于 5m 时，可能经过脉冲走过 3 次电缆长度的时间后，脉冲仍在上升，因此，当 $t_p < t_0/3$ 时，在电机端子上产生的尖峰电压峰值为

$$V_p = 3l_c \gamma_1 U_{dc} / V_p t_0 + U_{dc} \tag{2.3-220}$$

当 $t_p \geq t_0/3$ 时，尖峰电压峰值为

$$V_p = U_{dc} \gamma_1 + U_{dc} \tag{2.3-221}$$

由式 (2.3-220) 和式 (2.3-221) 可以看出：电缆长度越短，到达电机端子上的尖峰电压峰值越少。当电压脉冲很

陡或者电缆长度很长时,在电机端子上会出现全波反射。同时,逆变器脉冲上升时间越短,电缆长度越长,反射也越明显。由式(2.3-219)可以看出:电缆越长,振荡频率越小,与电机机械振荡频率越接近,产生共振的可能性就越大。因此,希望逆变器和电机的连接电缆应尽可能地短。采用同轴屏蔽电缆,可减少对地耦合电容。这时,电缆的波阻抗为

$$Z'_1 = (60/\sqrt{\epsilon}) \ln D/d \quad (2.3-222)$$

式中: ϵ 为绝缘层的相对介质系数; D 为屏蔽电缆内径; d 为单根导体外径。

由式(2.3-222)可以看出:增加 D/d 或减少 ϵ , Z'_1 增加,反射系数 γ_1 减少,尖峰电压幅值减少。

7.2.2.3 设计高谐波阻抗电机

逆变器产生的高次谐波分量使电机损耗增加。定子的谐波电流使定子铜损耗 I^2R 增加。转子中的高频电流使深槽的集肤效应在谐波频率下非常显著,这将使转子电阻和损耗大大增加。为了有效地抑制高次谐波产生的损耗,降低逆变器电源的瞬变电流 di/dt ,必须增加电机的高频谐波阻抗来减少高次谐波电流。集肤效应使转子电阻增加,低速运行时电阻压降占主要压降,因此,减少转子电阻对抑制低频运行产生的脉振转矩,扩大低速运行范围有利。设计时考虑选择合适的定、转子磁密以及槽形和槽配合,是提高谐波阻抗的一个主要途径。

7.2.2.4 加强电机结构部件的刚度

谐波电流产生谐波转矩,电机的振动和噪声增加。尤其是脉振转矩的频率和电机某一部件的固有频率接近时会产生较强的振动。因此,在减少电机低频电阻的同时,要加强电机结构部件的刚度。

7.2.2.5 采用耐电晕的绝缘结构

dV/dt 及尖峰电压脉冲破坏绕组绝缘,使电机寿命下降。提高变频电机运行寿命的一个重要途径是采用耐电晕的绝缘结构。耐高温、填充纳米超微粉材料聚酰亚胺类绝缘漆包线具有良好的抗电晕性能。因为用这些材料作外绝缘层,在电晕作用下形成抗电晕屏蔽层,以保护内部绝缘层在电晕放电时不受电子的直接轰击而使绝缘寿命提高。采用加有云母层的对地复合绝缘材料,以提高 dV/dt 及尖峰电压脉冲冲击的承受能力。

7.2.2.6 提高绝缘等级

在高于 20°C 的温度下,绝缘系统容易产生电离,引起局部放电。提高电机的绝缘等级,可确保电动机的安全运行。

采取了以上措施的电机,其容量可按实际负载选取,电机的功率因数、效率较高,电机的体积和质量小,可靠性提高。

7.2.3 电机结构设计

电机的结构从外形看,与普通的三相异步电动机一样,也是由定子、转子、端盖、轴承等组成。由于机车上的特殊要求,电机的安装按负载要求而定,安装结构尺寸与普通异步电动机不一定相同。由逆变器供电的异步电动机的结构特点主要有以下几点:

(1) 转子铁心冲片均采用 0.5mm 厚的冷轧硅钢片,导磁性能好,叠压系数高,过载能力强。定子端板采用黏结端板,由定子铁心冲片黏结而成,铁心的整体性好,不散齿,槽口无毛刺,嵌线时可保证相间绝缘和槽绝缘无破损,同时可减少高频振动噪声,提高电机的可靠性。

(2) 定子绕组采用散嵌绕组,电磁线采用耐电晕漆包圆铜线,对地绝缘采用耐电晕绝缘结构,匝间绝缘和对地绝缘

厚度加厚,可提高绝缘的耐电压应力。绝缘等级无特殊要求,一般为F级和H级。

嵌线定子采用VPI浸漆工艺,定子的一体化加强,绝缘强度提高,其耐电晕性、耐潮性、化学稳定性和导热性提高,电气、机械性能更加改善,电机的可靠性提高。

(3) 定子线圈采用Y形接法,线圈中承受的脉冲电压冲击的重复次数要比三角形接法的少。

7.2.4 电机试验

由于逆变器的供电特性与工频电源的供电特性不同,因此,电机的试验要求也不同。电机的试验按照IEC349-2《电力牵引—铁路机车车辆和公里车辆用旋转电机 第2部分:电子变流器供电的交流电机》和IEC 349-3《电力牵引—铁路机车车辆和公里车辆用旋转电机 第3部分:用损耗总和法来确定变流器供电的交流电动机的总损耗》执行,其具体区别如下。

7.2.4.1 测量仪器的要求

逆变器供电下电机运行所产生的高频附加损耗等于电机负载状态下的总输入功率减去基波频率的输入功率,总输入功率是由一个时间周期内的电压和电流的乘积得到,基波功率用同一采样,由傅里叶级数变换得到。

对测量仪器在测量范围内幅值和相位的漂移误差,仪器的准确度应在IEC349-2的容差允许范围内。因此,对功率表的准确度、外界衰减器的准确度和功率测量的总准确度都作了明确的要求。

7.2.4.2 试验电源的要求

由于逆变器的类型不同,输出的电源波形和谐波分量也不同,IEC349-2要求电动机的试验电源采用在运行使用的逆变器电源,或者采用与电源波形和谐波分量非常相似的电源。这样,试验结果才符合实际情况。

7.2.4.3 特性试验要求

整个电机试验的测量均采用数据采集仪进行功率测量。特性曲线上每点读取的功率读数分别为输入的总功率和基波功率。

电动机的规定特性和典型特性应为逆变器的供电特性,即在每个工作频率下,电动机线电压、电流、转速、平均转矩和输出功率的函数关系,也可作为转速函数的特性曲线。这些特性要考虑电源谐波引起的附加损耗。电压曲线要用基波分量的方均根值表示,电流曲线要用基波分量的方均根值和总电流的方均根值表示。

电机特性试验也可按IEC349-3用损耗综合法确定其总损耗。

8 行车安全装备

8.1 机车信号装置

机车信号是列车运行控制中重要的安全设备,它是由车载设备和地面设备共同构成的系统。车载设备即机车信号装置主要由机车信号接收感应器、信号接收主机、信号显示器组成。地面设备是指向车载设备发送信号的轨道电路。机车信号车载设备的工作过程是通过接收感应器接收地面轨道电路中的信号,经过接收主机识别处理后将其中有一定含义的信号通过显示器向司机显示。机车信号是铁路信号安全设备,它应满足安全性、抗干扰性、可靠性等要求。

机车信号的显示有色灯显示和速度显示两种方式。按《铁路技术管理规程》规定,机车信号色灯显示与地面信号机显示有对应关系:色灯显示器显示一个绿色灯光表示准许

列车按规定速度运行，表示列车接近的地面信号机显示绿色灯光；显示一个黄色灯光表示要求列车注意运行，表示列车接近的地面信号机显示一个黄色灯光；显示一个半黄半红灯光要求及时采取停车措施，表示列车接近的地面信号机显示红色灯光；显示白色灯光表示不复示地面上的信号显示，机车乘务人员应按地面信号机的显示运行等。

8.1.1 分类

机车信号有点式和连续式之分。点式机车信号是机车车载设备通过地面固定点的设备获得机车信号，如中国铁路机车信号发展初期的简易接触式机车信号和双频点式、变频点式机车信号。连续式机车信号是机车感应器通过地面轨道电路连续地获得信号。现中国铁路大量应用的是连续式机车信号，它又分为连续式和接近连续式。连续式机车信号系统中地面发送的信号在区间是连续的；接近连续式机车信号系统中地面发送的信号只设在接近区段，机车在进入接近区段才开始有机车信号，一般装在半自动闭塞区段。中国铁路轨道电路制式较多，对应不同的轨道电路制式曾出现与之配套的机车信号设备，如交流计数式机车信号、移频式机车信号等。随着铁路运输的发展，由于轨道电路制式的增多，机车运行交路逐步延长或机车的灵活调用，要求机车在不同地面轨道电路信号制式运行时仍有机车信号，为了避免安装多台专用的机车信号，近年来中国铁路开发并大量推广了通用式机车信号和主体化机车信号。

8.1.1.1 通用式机车信号

通用式机车信号是指当机车在多种不同信号制式的轨道上运行时都可以应用的通用化的机车信号设备。中国铁路在 20 世纪 80 年代开始研究开发通用式机车信号，早期的通用机车信号采用微处理器控制，不同制式的信号通过机车感应器接收后，由多个于不同制式相应的信号处理通道进行信号处理，由微处理器控制完成译码识别、输出显示等。90 年代初，中国铁路开始开发数字化通用机车信号并大量推广应用。其数字化的含义是信号处理过程采用现代数字信号处理技术，信号通过机车感应器接收后，在接收主机中将模拟信号转换成数字信号，由数字信号处理器进行信号接收处理。机车信号采用数字信号处理方式的优点是可以更加容易地实现多制式的通用化，同时可以获得较高的可靠性。

现已在中国铁路大量推广的 JT1-A/B 数字化通用式机车信号，其接收主机分为单机型和双机热备型，它采用同一感应器接收不同频率的信号，显示器为 8 色灯显示器。它可以接收全国铁路现有的各种制式的连续式轨道信号，各种制式的信号能够自动识别、转换。

8.1.1.2 主体机车信号

作为行车凭证的机车信号称为主体机车信号。当车载信号和地面信号设备共同构成的系统符合故障—安全的原则时，机车信号才可用作主体信号。按《铁路技术管理规程》的规定，主体化机车信号车载设备应具有机车信号运行数据记录的功能。

我国铁路列车运行控制系统中的地面信号系统与车载信号系统长期以来不同步发展，地面系统不能完全满足车载系统的安全性要求。由于铁路运输的需求，我国铁路的机车信号正在向主体化方向过渡，已开始按机车信号主体化的要求对既有线路地面信号系统的改造，并按主体化要求推广 JT1-CZ2000 型主体化机车信号车载系统。

我国地铁或城市轨道交通的车载信号一般都是作为行车凭证的主体信号。

8.1.2 系统构成

8.1.2.1 通用式机车信号车载设备组成

通用式机车信号设备一般由机车信号主机、机车信号带电源接线盒、机车信号接收线圈、机车信号显示器构成。JT1-A/B 型通用式机车信号车载系统设备的构成如图 2.3-210 所示。

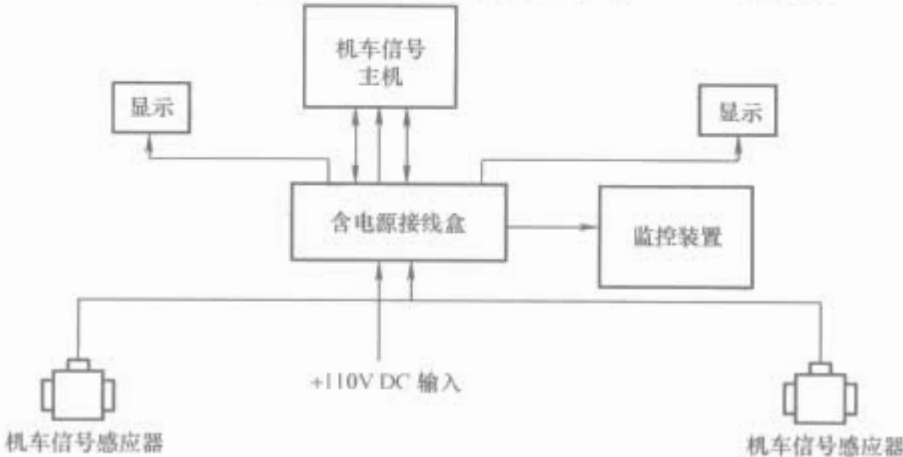


图 2.3-210 JT1-A/B 型通用式机车信号车载系统设备的构成

8.1.2.2 主体化机车信号车载设备组成

JT1-CZ2000 型主体化机车信号车载系统一般由主体化机车信号主机（含机车信号记录器）、机车信号带电源接线盒、机车信号双路接收线圈、机车信号显示器等构成。JT1-CZ2000 型主体化机车信号车载系统构成框图如图 2.3-211 所示。

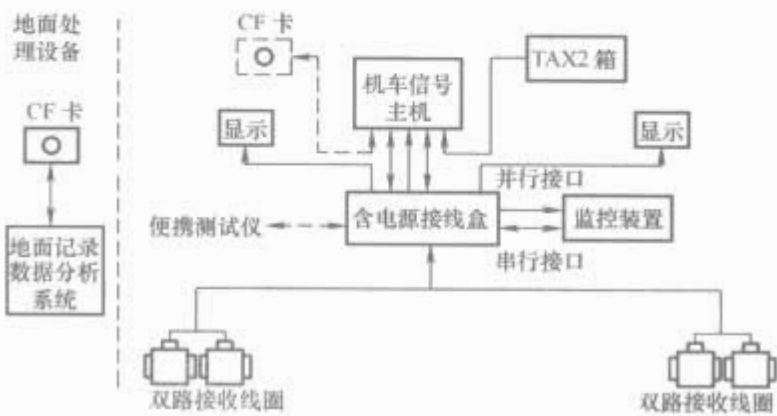


图 2.3-211 JT1-CZ2000 主体化机车信号车载系统构成框图

8.1.2.3 主体化机车信号车载系统功能

- (1) 接收钢轨线路（或环线）中传输的机车信号信息，给出作为行车凭证的机车信号显示；
- (2) 为列车运行监控记录装置提供机车信号信息；
- (3) 在移频（载频 550~850Hz）、交流计数区段，具有降为通用机车信号功能；
- (4) 具有数据记录功能。

8.1.3 主要技术指标

根据主体化机车信号系统技术条件，主体化机车信号车载设备应达到的主要技术指标如下。

8.1.3.1 应变时间

- (1) UM71、移频接收信息的应变时间（包括制式转换）应不大于 2s，从有信息到无信息的应变时间应不大于 4s。
- (2) 接收交流计数信息时，其应变时间应不大于 7s；HU 到无信息应变时间不大于 7s；L、U、UU 到无信息应变时间不大于 9s。

8.1.3.2 接收灵敏度

- (1) 在移频制式下，其接收灵敏度应符合表 2.3-93 的要求。

表 2.3-93 移频接收灵敏度

载频 (Hz)			550	650	750	850
电气化区段	钢轨最小短路电流 (mA)		150	120	92	66
	机车信号灵敏度	钢轨短路电流值 (mA)	113±17	90±15	69±10	50±8
		主机电压值 (mV)	15.9±2.4	14.6±2.2	12.4±1.8	10.0±1.5
非电气化区段	钢轨最小短路电流 (mA)		50	40	33	27
	机车信号灵敏度	钢轨短路电流值 (mA)	40±6	32±5	26±4	22±3
		主机电压值 (mV)	5.6±0.8	5.1±0.8	4.7±0.7	4.5±0.7

- (2) 在交流计数制式下, 其灵敏度应符合下列要求:
1) 非电气化区段 50Hz 交流计数的钢轨短路电流值为 (0.75±0.15) A。
- 2) 电气化区段 25Hz 交流计数的钢轨短路电流值为 (1.05±0.1) A。
- (3) 在 UM71 制式下, 其灵敏度应符合表 2.3-94 的要求。

表 2.3-94 UM71 接收灵敏度

载频 (Hz)		1700	2000	2300	2600
钢轨最小短路电流值 (mA)		500	500	500	450
机车信号灵敏度	钢轨短路电流值 (mA)	310±47	275±41	255±38	235±35
	主机电压值 (mV)	100±15	100±15	100±15	100±15

8.1.3.3 车载设备的译码和抗干扰性

在轨道回流为 1000A、不平衡系数为 10% 的电气化区段, 主体机车信号车载设备应能正确译码。对于特殊区段, 抗电气化干扰的能力应根据实际要求确定。

8.1.3.4 车载设备的可测试性

车载设备应具有良好的可测试性, 通过便携式测试设备, 在车上可实现对车载系统进行功能测试。

8.1.3.5 对环境温度的要求

周围环境温度为 (−25~55)℃ 条件下, 设备应可靠地工作。

8.1.3.6 对接收线圈的要求

(1) 接收线圈的安装位置。机车接收线圈的线包底部距钢轨轨面为 155mm±5mm, 线圈中心距离钢轨轨面中心为

0mm±5mm, 并要求结构牢固, 能抗最高允许车速下冰雪、飞石等的冲击, 具有良好的防水防潮性能。

(2) 接收线圈内部应具有冗余线圈或测试线圈, 测试设备可通过冗余线圈或测试线圈对车载信号设备进行闭环测试。

(3) 冗余线圈或测试线圈电路开路时, 应不影响主机正常工作。

(4) 接收线圈可接收 ZPW-2000 系列、交流计数、移频信号。

(5) 当接收线圈每一路线圈与 4kΩ 电阻相连时, 在表 2.3-95 给出的钢轨短路电流和频率下, 各接收线圈应达到规定的电压。在上述条件下, 当一路接收线圈开路时, 另一路的接收电压变化不大于 15%。

表 2.3-95 接收线圈的频率响应

频率 (Hz)	25	550	650	750	850	1700	2000	2300	2600
钢轨短路电流 (mA)	1050	113	90	69	50	310	275	255	235
接收电压 (mV)	9.3× (1±7.5%)	15.9× (1±7.5%)	14.6× (1±7.5%)	12.4× (1±7.5%)	10.0× (1±7.5%)	100× (1±7.5%)	100× (1±7.5%)	100× (1±7.5%)	100× (1±7.5%)

(6) 接收线圈每路开路下测试, 线圈直流电阻值误差应不大于标称值的 ±7.5%; 在 1000Hz 条件下测试, 电感量误差应不大于标称值的 ±7.5%。

8.1.3.7 对主机的要求

(1) 车载设备主机应采用冗余结构。采用 2×2 取 2 结构时, 工作机故障自动切换到备用机, 切换时间应不大于 0.5s。工作机和备用机都应有工作正常或故障表示。

(2) 主机应有开机自检功能, 自检正常后进入工作状态并给出工作正常表示。

(3) 主机对外应具有并行和串行接口。串行接口可采用 RS485 或 CAN 总线。

(4) 主机应具有良好的可测试性, 在检修时可自动测试各项功能及指标。

(5) 主机应安装在机车内便于检测的地方。

8.1.3.8 对显示器的要求

显示器可采用点阵式 LED 显示方式或 LED 方式 8 色灯显示器; LED 方式 8 色灯显示器可工作于 48 (1±10%) V 的点灯输出电压, 工作电流小于 55mA。

8.1.3.9 对主体机车信号记录器的要求

(1) 记录器应能记录以下信息: 从接收线圈收到的机车信号信息的信号波形、机车载频切换装置状态、机车运行方向信息、机车信号输出信息、主机工作状态、机车电源工作电压状态、自 TAX2 箱通信接口的时刻、线路公里标、车站编号、信号机编号等定位信息。

(2) 记录器应以独立插板的形式嵌入主机箱, 记录器故障后不影响主机正常工作。

(3) 记录器存储容量应满足记录长大机车交路所需信息的要求。

(4) 开关量采集接口输入阻抗应大于或等于 30kΩ。

(5) 接入接收线圈的输入阻抗应大于或等于 200kΩ。

- (6) 地面处理分析系统应具有故障分析和统计功能。
- (7) 记录数据应读取方便, 采用移动存储器时应有防止丢失的措施。
- (8) 应具有通信接口扩展功能。

8.1.3.10 对电源的要求

- (1) 电源应采用双套电源, 一套故障时另一套能保证系统正常工作。
- (2) 额定输入电压为 DC 110V。机车电源电压在 77~138V 的变化范围内, 系统应正常工作。

8.1.4 技术原理

下面以 JT1-CZ2000 型主体机车信号车载设备为例介绍其技术原理。

8.1.4.1 主机

- (1) 硬件结构。主机由主机板 A 插板、主机板 B 插板、连接板和记录器插板构成, 如图 2.3-212 所示。主机板完成信号接收及输出工作, 两块主机板完全相同, 与双套 110V 电源、双路接收线圈构成双套热备冗余系统。

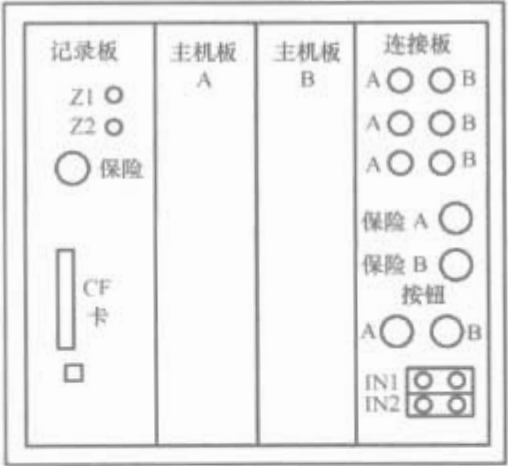


图 2.3-212 典型的主机机箱结构

主机的结构原理框图如图 2.3-213 所示, 双路接收线圈的一路接主机板 A, 另一路接主机板 B, 主机输出除原来并行输出外, 预留了 CAN 总线输出或 RS485 输出, 可支持双向信息传输。

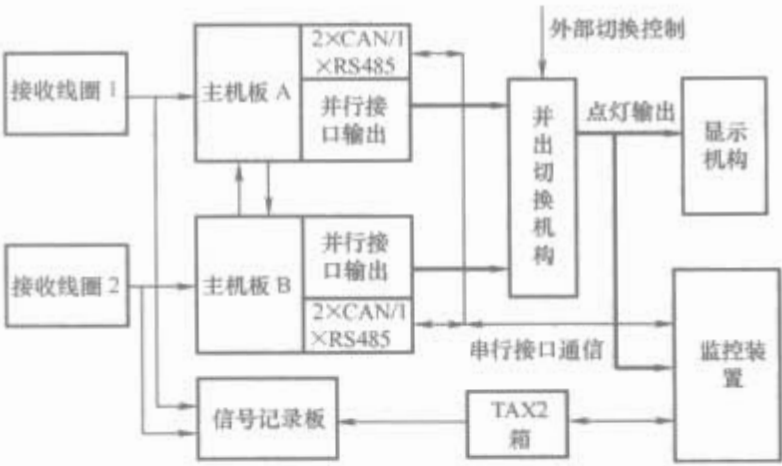


图 2.3-213 接收主机结构原理框图

- (2) 二取二的原理。主机的每块主机板内采用二取二容错安全结构, 其含义是每块主机板中有两路独立的接收译码通道, 两路的译码输出进行比较, 比较一致才有有效输出, 如图 2.3-214 所示。

每块主机板对应一路接收线圈绕组, 信号输入部分采用隔离放大器, 主机板内两路 DSP 同时从各自的 A/D 电路接收信号, 译码结果通过双口 RAM 与输出控制部分进行数据交换。

- (3) 双套热备原理。JT1-CZ2000 的双套热备是指由机车信号主机内双套主机板、接线盒中的双路电源、双路接收

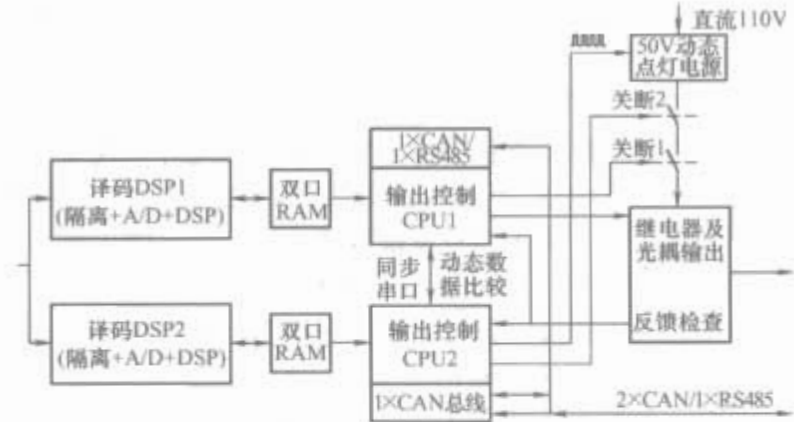


图 2.3-214 主机板二取二结构框图

线圈共同组成的双套热备系统。主机完成双套热备输出的切换。

主机的双套切换继承了 JT1-B 切换电路: 主机上电后随机由双套主机板中的一套占据输出位置, 即处于工作状态; 另外一套处于备用状态。当占据输出位置的主机故障时, 将自动关断点灯电源, 失去输出位置状态, 而由备机获得输出位置状态, 从而实现双机的自动切换。另外, JT1-C2000 的主机双套主机板之间有动态方波信号进行信息交换, 当工作主机前级故障“掉灯”时, 备机正常“有码”信息会传递到工作主机, 工作主机会短时自动切掉输出, 使系统自动转到备机工作。

通过外部切换控制(来自面板或测试仪)可以强行设置 A、B 机为工作机或是备机, 为系统自动测试提供了基础。对感应器的测试方法是通过对感应器加一直流信号, 当感应线圈正常时, 由于感应器线圈电阻较低, 直流电压被消耗。

- (4) 信号接收处理原理。轨道电路信号通过机车信号双路接收线圈感应接收。双路接收线圈中的每路信号各对应一个主机板, 由主机板中的两路接收电路同时接收。进入主机板的信号由隔离放大器进行隔离, 然后经 A/D 转换, 由 DSP 芯片进行处理、译码。

DSP 芯片采用高速 32 位浮点运算 DSP 芯片。接收程序分移频、UM71、交流计数和 UM2000 接收模块, 采用 DSP 循环运算, 平行作业。DSP 同时实时接收 4 类制式的信号。如果机车运行交路没有某种制式, 则应通过设置使程序不接收该制式。

8.1.4.2 双路接收线圈

新设计的 JT·JS 型双路接收线圈内部设计为双路接收线圈, 每路接收线圈对应机车信号主机中的一块主机板。接收线圈中一路存在故障时, 主机可以通过自动切换控制电路, 把对应正常接收线圈的主机转换成工作机, 提高了系统的可靠性。

新设计的双路接收线圈保持原接收线圈的电气参数、安装位置不变, 与 TB/T 2859—1997《JT1 型通用式机车信号设备》规定的单路接收线圈相同。新的双路接收线圈在设计时考虑了双路线圈断路、短路对系统接收电路电气参数的影响, 保证一路线圈断线造成的另外一路线圈接收的幅度变化不超过 15%。

另外, 双路接收线圈可实现车载系统的闭环自动测试。测试时线圈的一路作为测试线圈发送信号, 另一线圈接收信号, 并控制与接收线圈相连接的主机进行译码接收, 从而实现车载系统的闭环测试。这种设计既完成了闭环测试, 又省去了测试线圈。

8.1.4.3 显示器

传统的机车信号显示器是基于色灯显示信息的, 每个显

显示器中对应8色灯有8个灯泡。灯泡由灯丝构成,在振动情况下长时间使用、点灯显示的不断变换和新的机车信号信息定义标准中闪光信号带来的电源通断,都容易造成灯泡断丝。灯泡断丝造成的直接故障是显示全无。此外,现场使用的灯泡功率从5~8W不等,种类很多,功耗较大,质量也参差不齐,在整个机车信号系统故障中占有一定的比率。随着列车速度的提高,灯丝振动带来的问题可能会更多。另外,传统的显示器最多只可以显示8种不同的信息,显示能力有限。为了提高显示器的可靠性,JT1-CZ2000系统要求使用双面8色灯LED机车信号显示器或双面点阵式显示器。

(1) 双面8色灯LED机车信号显示器。双面8色灯LED机车信号显示器选用了专为机车信号显示设计的LED信号灯,可靠性高,耐压高。8色灯LED机车信号显示器已通过电磁兼容试验,包括2000V浪涌试验。显示器内部电路有冗余措施以防止单点故障造成的完全无显示。

(2) 双面点阵式机车信号显示器。双面点阵式机车信号显示器是新开发的机车信号显示器,可以实现数字方式显示,也可以实现模拟现有有色灯的图像方式显示。使用上与现有有色灯显示器兼容,可直接互换。

新型双面点阵式显示器设计充分考虑了系统的故障—安全:一是显示器从灯位输出取得供电电源,在机车信号主机无输出时,显示器一定无显示输出;二是在电路中利用双CPU共同进行信号输入,扫描显示,对点阵输出进行反馈检查。

双面点阵式显示器以点阵式数码管代替原有的8灯位显示机构,在一块显示模块上可以显示不同意义的信息,减小了显示设备的体积。它既可以显示图形,又可以显示数字符号,显示意义可以扩展,克服了原有双面8显示机构显示信息少的缺点。

双面点阵式显示器硬件结构如图2.3-215所示,使用方式与原有显示器兼容,工作电源取自灯线输出。双CPU同时采集来自点灯电缆中的点灯信息,通过串行接口进行比较。比较内容包括灯位编码、显示图形的缓冲数据和数码管显示控制电路反馈数据。

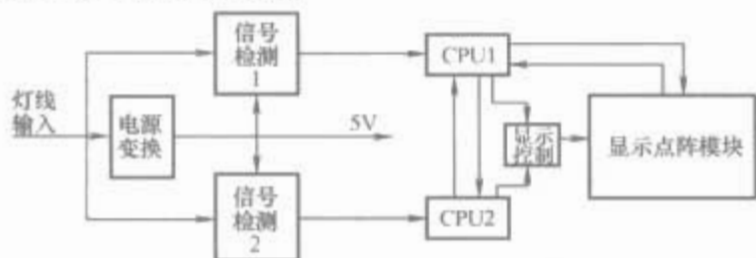


图 2.3-215 点阵式显示器硬件原理

8.1.4.4 记录器

记录器车载部分实现对机车信号的动态运行信息的数据采集和存储,以插件形式插在机车信号主机箱内,应用大容量CF卡(compact flash card)作为存储介质进行记录。

记录器数据地面分析处理系统是记录器系统的一个重要组成部分,其主要功能是转储车载记录器所记录的数据信息,并形成相应的状态信息文件和数据波形文件,提供对相应文件数据的显示、分析、查询、统计和打印等功能。

记录器数据地面分析处理系统的软件功能主要包括文件管理与数据转存、数据波形文件操作、数据波形文件频谱分析和状态信息文件分析等四部分。

8.2 列车运行监控记录装置

列车运行监控记录装置(简称监控装置)是机车设备

的组成部分,是保障列车运行安全和改善机车乘务作业管理的重要设备。监控装置是根据中国国情自主开发的车载模式行车安全控制系统,俗称“火车黑匣子”,是具有中国特色的ATP(列车超速防护)车载设备。它由监控设备和地面处理系统共同构成。车载设备由车载装置主机、显示器、速度传感器、压力传感器等组成;地面系统由数据转储器、地面开发软件、地面处理软件等组成。监控装置是铁路保障行车安全的重要安全设备,它满足故障—安全原则。

监控装置于1995年起开始在路内安装和使用。1995年开始普及推广以LKJ-93型为主型的监控装置,到2001年开始普及推广LKJ2000型监控装置。前者为单套主机、数码显示配置方案,后者采用了双机冗余、液晶屏幕显示等技术,从功能、可靠性方面都得到了加强。

监控装置主要功能包括:

(1) 监控功能。

- 1) 防止列车越过前方关闭的信号机。
- 2) 防止列车运行速度超过线路(或道岔)允许速度及机车、车辆允许的构造速度。
- 3) 防止机车以高于规定的限制速度进行调车作业。
- 4) 在列车停止的情况下,防止列车向前/向后溜逸。
- 5) 可按照列车运行揭示的要求控制列车运行速度在临时限速地段不超规定的限制速度。

(2) 显示功能。

- 1) 显示列车运行的实际速度及前方线路的限制速度(或目标速度)。
- 2) 显示距前方信号机距离及前方信号机种类。
- 3) 显示前方运行线路状况,包括桥梁、坡度、道口、隧道等。
- 4) 可显示机车优化操纵速度曲线或手柄级位曲线。
- 5) 其他相关运行参数显示。

(3) 记录功能。

- 1) 开/关机时相关参数记录。
- 2) 乘务员输入参数(或IC卡输入)记录。
- 3) 列车运行参数记录。
- 4) 事故状态记录。

监控装置对机车实施制动控制主要分5种情况:

(1) 报警。当列车速度超过报警速度时,显示器发出语音报警以提示乘务员注意。

(2) 卸载。当列车速度超过允许值时,装置切除机车牵引电流(即将牵引力减为0,但电制动工况时不切除)。

(3) 常用制动。当卸载不能使列车减速,且列车速度超过常用制动限制速度时,由监控装置发出指令使列车实施常用制动,使列车减速。常用制动后,当列车低于规定的安全速度时,允许司机缓解。

(4) 紧急制动。当列车速度超过紧急制动的限速值时,监控装置发出实施紧急制动指令,使列车立即停车。紧急制动不允许司机缓解,当列车速度为0时,自动缓解。

(5) 系统故障。当系统中A、B机同时故障时,显示器发出故障报警,要求司机在3min之内关闭监控主机电源,否则实施紧急制动。

8.2.1 系统组成

以LKJ2000型监控装置为例进行介绍。

8.2.1.1 车载设备

LKJ2000型监控装置车载设备系统构成如图2.3-216所示,主要由主机箱、显示器、事故状态记录器(选件)、速

度传感器、压力传感器以及双针速度表组成。其速度信息来

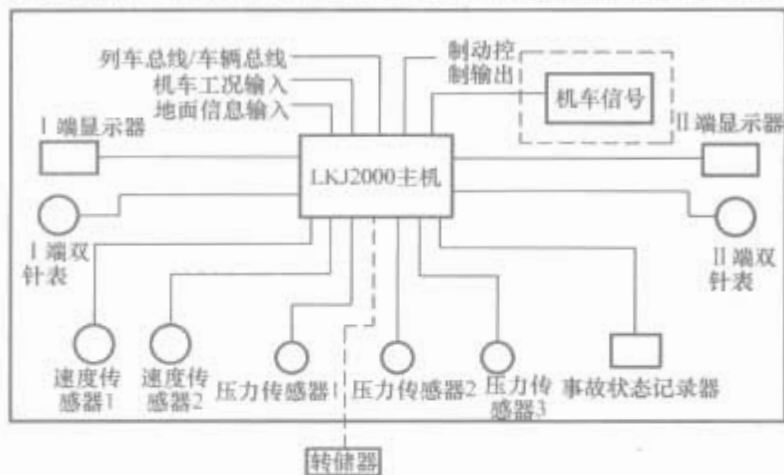


图 2.3-216 LKJ2000 型监控装置车载设备系统构成

自安装在机车轮对上的 TQG15 或 DF16 光电式速度传感器，速度信号的基本配置为二通道（可扩充至三通道）。二通道速度信号相位相差应为 90°，满足装置相位防溜功能的需要。在无相位防溜功能要求的情况下，二通道速度信号可分别取自两个速度传感器。前方轨道占用信息取自 JT1-A（SJ93）、JT1-B（SJ94）通用式机车信号装置或 JT1-CZ2000 主体化信号装置，可通过机车信号装置与监控装置之间的 RS485/RS422 串行通信或电平方式获取。列车管压力、机车均衡风缸压力及机车制动缸压力信息采用压力变送器取得。双针速度表是用指针方式指示列车速度与限制速度，由监控装置驱动。在装置关机情况下，该仪表由数/模转换盒驱动指示列车速度。LKJ2000 监控主机、显示器、速度传感器、压力传感器如图 2.3-217 所示。



图 2.3-217 LKJ2000 型监控装置车载设备

8.2.1.2 地面系统

监控装置地面设备主要由转储器、IC 卡/读卡器、地面开发软件、地面处理软件、控制参数开发软件和测试台等组成。

(1) 转储器。转储器是一种把监控装置的记录数据转移到地面微机的设备。内有 8M 字节 Flash 存储器用于存放数据，采用 RS232 方式与车载设备或地面微机进行通信。转储器面板上配有 4×20 字符液晶显示器及 3 排×4 列薄膜键



图 2.3-218 转储器外形

盘，可方便地进行数据文件的收、发、删除、恢复、列表等操作，是可选的地面设备之一。转储器外形图如图 2.3-218 所示。

(2) IC 卡/读卡器。IC 卡/读卡器是监控装置信息写入的一种设备。在乘务员出乘前将线路的临时限速、计划路票等揭示信息及车次、司机信息等信息一次写入到大容量的 IC 卡（有 2M 字节容量）内，再由乘务员输入至车载监控装置，监控装置主机依据 IC 卡提供的信息进行临时限速控制，达到行车安全控制的目的。

(3) 地面开发软件。监控装置地面开发软件是在地面上将铁路沿线的工务、电务数据及线路限速等有关数据进行录入，编译成监控装置主机 CPU 能识别的数据，再固化到芯片后装在监控装置上使用的一种数据开发软件，具有如下特点：

- 1) 兼容 LKJ-93 和 LKJ2000 型数据格式和操作习惯；
- 2) 预留与工务地面数据库接口，可直接从工务数据库中读取有关信息。

地面开发软件系统数据显示主界面如图 2.3-219 所示。



图 2.3-219 地面开发软件主界面

(4) 地面处理软件。列车运行监控记录装置地面处理软件系统采用了 Windows 运行环境，主要用于将监控装置运行中记录的数据转换成人们易读的文件及图形界面。为了便于机务管理人员对列车运行状态进行分析及管理，还具备相应的分析子程序，具有以下特点：

- 1) 可对退勤流水作业、文件处理、数据分析、办理退勤、文件查询随时切换，并提供从转储到文件分析，质量分析、运用安全分析，以及查询全过程的支持。
- 2) 快速检索各个文件记录和各种违章记录，其中安全因素内容也可以在全程记录和运行曲线中直接定位。
- 3) 全程记录任意检索，迅速定位。
- 4) 具有安全情况、设备质量的报表打印和预览功能。

地面处理软件主界面如图 2.3-220 所示。

(5) 控制参数开发软件。控制参数开发软件用于对监控软件的各项监控参数进行编辑，并与监控软件合并生成监控装置主机 EPROM 芯片写片文件，是一个用于现场对监控软件二次开发的软件。该软件设有九重密码，只有授权部门才可修改参数。

通过对监控软件控制参数的设定、修改，可以实现不同应用场合下采用不同的监控模式，从而使监控软件具有很强的通用性。控制参数开发软件显示界面如图 2.3-221 所示。

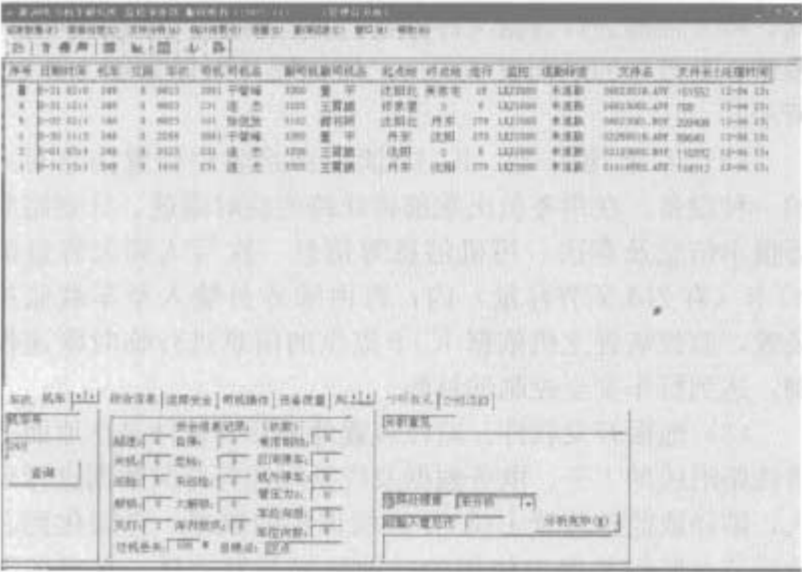


图 2.3-220 地面处理软件主界面



图 2.3-221 控制参数开发软件界面

8.2.2 主要技术参数

以 LKJ2000 型监控装置为例介绍监控装置主要技术参数。

8.2.2.1 适应环境条件

装置满足 TB/T 3021—2001《铁道机车车辆电子装置》要求，电磁兼容性满足 TB/T 3034—2002《机车车辆电气设备电磁兼容性试验及其限值》的要求。

装置适合于各种电力机车、内燃机车及动车组；适应自动及半自动闭塞方式；并适应国内现存的各种信号制式，包括移频（含 18 信息移频）、交流计数、极频和 UM-71 等（装置所需机车信号信息取自通用式机车信号装置）。

8.2.2.2 机械尺寸

- (1) 主机箱：534mm×358mm×340mm（宽×深×高），质量为 25kg。
- (2) 屏幕显示器：308mm×228mm×135mm（宽×深×高）。屏幕的前面板：340mm×250mm（宽×高）。

8.2.2.3 电气参数

电气参数包括电源、CPU、存储器及 I/O 配置等，详见表 2.3-96。

表 2.3-96 LKJ2000 型监控装置电气参数

参 数	指 标
系统电源	
输入直流电压范围(V)	77~137
功耗(W)	≤200
内部供电(V/A)	[+5×(1±2%)], [+12×(1±5%)], [-12×(1±5%)] [+24×(1±2%)]/0.4 [+15×(1±5%)]/0.65(供速度传感器) [+15×(1±5%)]/0.65(供压力传感器)

续表

参 数	指 标
输入欠电压保护(V)	75×(1±6%)，可自恢复
输入过电压保护(V)	140×(1±2%)，可自恢复
CPU 和时钟基准	
监控记录插件	
处理器	MC68332
主频	fosc 为 16MHz
通信插件	
处理器	DS80C320MCL
主频	fosc 为 11.059 2MHz
地面信息处理插件	
处理器	TMS320F206(DSP)
主频	fosc 为 20MHz
存储器配置	
监控记录主机	
程序存储器(MB)	1(可扩充至 2)
数据存储器(MB)	1(可扩充至 2)
通信插件	
程序存储器(KB)	32
数据存储器(KB)	32
地面信息处理插件	
程序存储器(KB)	32
I/O 配置	
数字光电隔离输入通道	
机车信号输入通道	16
(50V)通道数	
机车工况输入通道	8
(110V)通道数	
数字输出通道(制动控制	7
输出)通道数	
输出方式	继电器触点输出
输出隔离交流电压(V)	≥1000
触点输出容量	
直流电压(V)	110
直流电流(mA)	300
频率量输入接口(速度信	
号输入)	
通道数	4
信号幅值(V)	0~40(峰-峰值)，1~6kHz
模拟量输出通道	
通道数	3
速度表指针驱动	2 通道，信号幅值 0~20mA，精度±1%
里程计驱动	1 通道，信号幅值 DC 24V，脉冲宽度≥200ns
通信接口	
主机与转储器接	1 路
口 RS232	
主机与显示器接口 CAN	2 路
显示器与 IC 卡接	1 路
口 RS485	
主机与事故状态记录器	2 路
接口 CAN	
数据传输速率	
CAN 总线 (kbit/s)	500
同步口 (Mbit/s)	1
彩色显示屏	10in TFT 高度液晶屏

8.2.3 技术原理

以 LKJ2000 型监控装置为例介绍监控装置原理。

8.2.3.1 主机箱原理

监控装置主机采用双套热备冗余工作方式，由 A、B 两组完全独立的控制单元组成。每组单元都有完整的信号输入及控制输出接口模块。单元内部各不带 CPU 的模块之间采用 VME 并行总线与监控主机模块连接，不带 CPU 的模块包括模拟量输入/输出模块、数字量输入模块、数字量输入/输出模块及电源模块；带 CPU 的模块之间采用 CAN 标准串行总线连接，这些模块包括监控主机模块、地面信息处理模块及通信模块。系统内部串行通信网络 CAN 也采用 A、B 组冗余方式。A、B 组监控主机模块之间采用同步通信方式进行数据交换。主机箱与显示器及事故状态记录器之间采用与主机箱内部网络相同的双路 CAN 网络进行连接。LKJ2000 型监控装置 A、B 机双套冗余通信框图如图 2.3-222 所示。

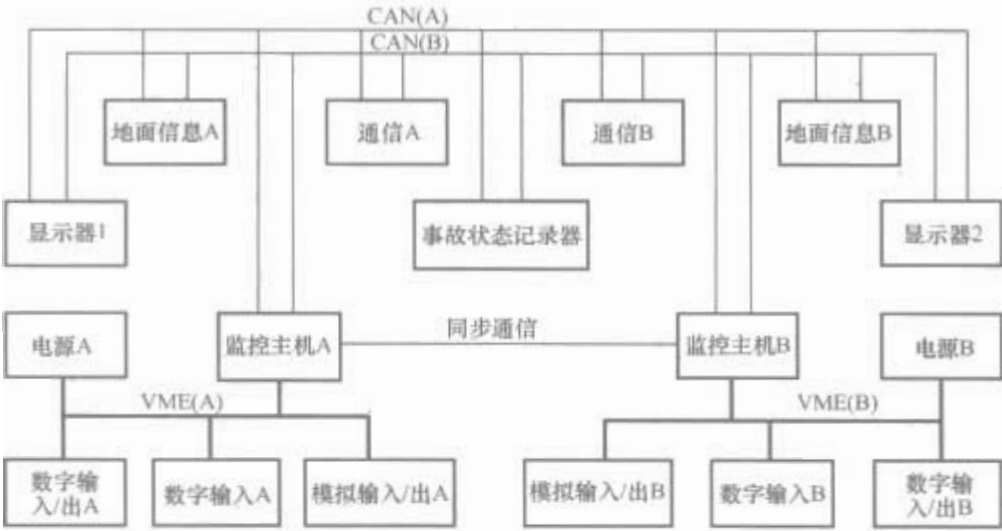


图 2.3-222 LKJ2000 型监控装置 A、B 机双套冗余通信框图

主机箱采用 6U×160（高度×深度）标准机箱结构，其宽度尺寸为 84R（R=5.08mm）。主机箱为系统控制中心，其内部由 A、B 两组完全相同的控制单元组成（左边为 A 组，右边为 B 组），每组有 8 个插件位置（包括一个预留位置），各插件位置以机箱中心线为基准对称排列，各插件之间采用 VME 标准总线母板连接。机箱采用背板对外出线方式，所有输入/输出信号均通过机箱背板连接器引出，在背板内侧装有过电压抑制板。LKJ2000 型监控装置 A、B 机双套冗余通信框图如图 2.3-223 所示。



图 2.3-223 LKJ2000 型监控装置 A、B 机双套冗余通信框图

(1) 数字信号输入。数字信号输入主要包括机车信号点灯条件输入和机车工况信号输入。机车信号点灯条件输入为 50V 电平信号，取自通用式机车信号装置；机车工况信号输入为 110V 电平信号，取自机车控制回路。监控装置从通用式机车信号装置获得机车信号点灯条件后分别输入至数字输入插件 A、数字输入插件 B，经隔离等处理后分别输出监控

主机 A 及监控主机 B。机车工况信号输入主机后，先经过过电压抑制板处理（抗干扰），然后输入至数字输入/输出插件 A 及数字输入/输出插件 B。

(2) 模拟信号输入。

1) 压力信号输入。监控装置可提供 4 路压力信号输入接口。在通常情况下，输入列车管压力信号、制动缸压力信号以及均衡缸压力信号各 1 路。压力信号采集全部采用相同的 TQG14 型压力传感器，各个压力传感器共用供电电源，由 A、B 机电源插件输出的电源并联后供给。每路压力信号分别输入至 A、B 机模拟量输入/输出插件的压力信号接口。

2) 速度信号输入。装置可提供 3 路速度信号输入接口。速度信号取自安装在车轴上的 TQG15 型速度传感器。速度信号可取自 1 个或 2 个速度传感器，如果采用相位防溜功能，则要求 2 路速度信号相位相差 90°。2 路或 3 路速度信号同时输入至 A、B 模拟量输入/输出插件的速度信号接口。

各个速度传感器共用供电电源，也由 A、B 机电源插件输出的电源并联后供给。

(3) 数字信号输出。装置提供 6 路电平控制输出及 1 路紧急制动控制输出。其中 3 路常用制动控制输出用于“卸载”、“关风”和“减压”，另外 3 路备用。输出容量为 300mA（110V），可直接驱动制动装置电磁阀，并可根据要求采用动合触点或动断触点方式输出。紧急制动控制输出采用电压输出方式，输出容量为 300mA（110V），该输出接口是安全运输输出通道，具有相应自检功能，其输出是配合我国机车采用的电制动的紧急制动阀设计的。主机内 A 机与 B 机数字输入/输出插件中制动控制输出都具有控制输出功能。

6 路电平控制输出及 1 路紧急制动控制输出信号均需经过过电压抑制板处理，以防止外部 110V 回路干扰进入内部电路。

(4) 模拟信号输出。模拟输出信号用于驱动双针速度表，可驱动实际速度与限制速度及里程计。驱动信号由模拟输入/输出插件提供，信号为 0~20mA 电流信号。

(5) 系统故障电路。当主机 A、B 同时故障时，系统故障电路将产生系统故障输出：一方面输出 110V 故障信号至显示器，驱动蜂鸣器报警；另一方面启动过电压抑制板上 3min 延时电路，要求在 3min 内关闭主机电源，否则实施紧急制动。出现系统故障时，系统故障电路将封锁 A、B 机制动控制输出，3min 后由过电压抑制板完成紧急制动控制，如图 2.3-224 所示。

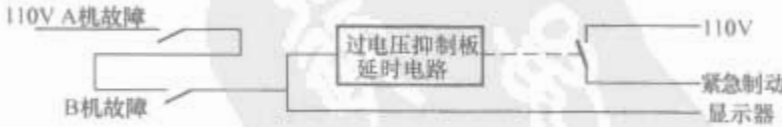


图 2.3-224 LKJ2000 型监控装置系统故障输出示意

(6) 监控记录插件介绍。监控记录插件作为 LKJ2000 监控装置的主机模块，是系统的核心部件。模块以 32 位微处理器 MC68332 为 CPU，主要完成地面线路数据的存储与调用、运行状态数据的记录与同步、控制模式曲线的计算、实时时钟的产生，并通过双路 CAN 串行总线或 VME 并行总线实现对系统其他模块的控制与管理。其他模块中带 CPU 的模块通过 CAN 网络与主机模块交换数据，而不带 CPU 的模块通过 VME 并行总线与主机模块连接。工作主机

与热备主机之间的数据交换是通过同步通信实现的。记录用数据存储器和实时时钟器件采用非易失性存储器件，因而在无需外部电池的情况下可实现数据的长期可靠保存。记录数据的转储通过监控主机插件上的 RS232 通信接口完成。

监控软件位于监控主机插件的 U3、U4 芯片中，由微控制器 MC68332 执行，实现各种监控功能和记录功能。监控软件的控制原理都是基于车载地面数据的一种实时控制模式。

软件设计中对双机热备的处理原则如下：

(1) 主备机的确认。上电或复位时，软件首先检测本机是 A 机还是 B 机。若 A 机和 B 机均工作在备机方式，以备机的身份进行通信，发送主备状态、A/B 机标志、本机最近一次处于主机状态的时间等信息，通知对方。

双方收到对方信息后，均与本机相应信息进行比较，时间较近者自动转为主机，较旧者自动转为备机，也就是说，上次谁是主机，本次仍以主机身份运行。

当通过时间无法决定主备机时，以 A 机优先的原则决定 A 机为主机，B 机为备机。主机在运行过程中，随时刷新自己处于主机状态的最新时间，便于下次比较。

(2) 单机的确认。当系统中某一监控主机与另一主机较长时间无法通信时，此插件便工作在单机状态。为了能在主机突然故障时原备机能迅速转为主机接管控制权，这个“较长时间”不能设得太大，一般应小于 1s。但是，在监控软件复位期间，由于自检时间较长，双机进入正常状态的时间差别较大，为了避免因此造成自检较快的一方提前转为单机，在复位时这个时间又不能设得太小。目前，软件的单机确认时间见表 2.3-97。

表 2.3-97 软件单机确认时间 s		
机 别	复位后延时	距上次收到对方信息延时
A 机	1.5	0.5
B 机	2.0	0.8

(3) 主/备机的切换。在主/备机均能运行工作的情况下，原则上不进行主备机的切换。只有在下述情况之一发生时例外：

- 1) 主机的地面数据校验失败而备机校验正常时；
 - 2) 主机的记录区有故障而备机记录区正常时；
- 当然，因一方通信故障也将导致主备机的切换。

(4) 主/备冗余处理。采集数据的冗余处理方法是，备机应不断地向主机发送自身采集到的各种信息，如速度、压力、时间等，同时将这些信息相关硬件的故障状态发给主机。主机根据双方信号的可靠程序决定某个信息以谁为准。

(5) 当两子系统中相同模块相同通道出现故障时，应视故障部位重要性实施降级控制或作系统故障处理。当某块监控插件出现 CAN-A 和 CAN-B 通信同时故障时，该插件能单独按系统故障处理；当双机紧急制动输出电路同时故障时，也按系统故障处理。

按系统故障处理的监控插件停止发送故障电路驱动脉冲，产生系统故障输出。但只有两套系统同时产生系统故障输出时，才会驱动时间继电器，3min 后产生紧急制动。

(6) 数据记录的原则。A 机和 B 机的记录数据应完全保持一致。备机数据应是主机数据的完全映像，这样做可避免某一子系统出现永久性故障其中记录数据无法转录时，出现数据丢失的现象。转录数据应是唯一的，如主、备机工作

均正常，可以任从 A 机或 B 机转录口进行转录。
监控软件主程序流程图如图 2.3-225 所示。

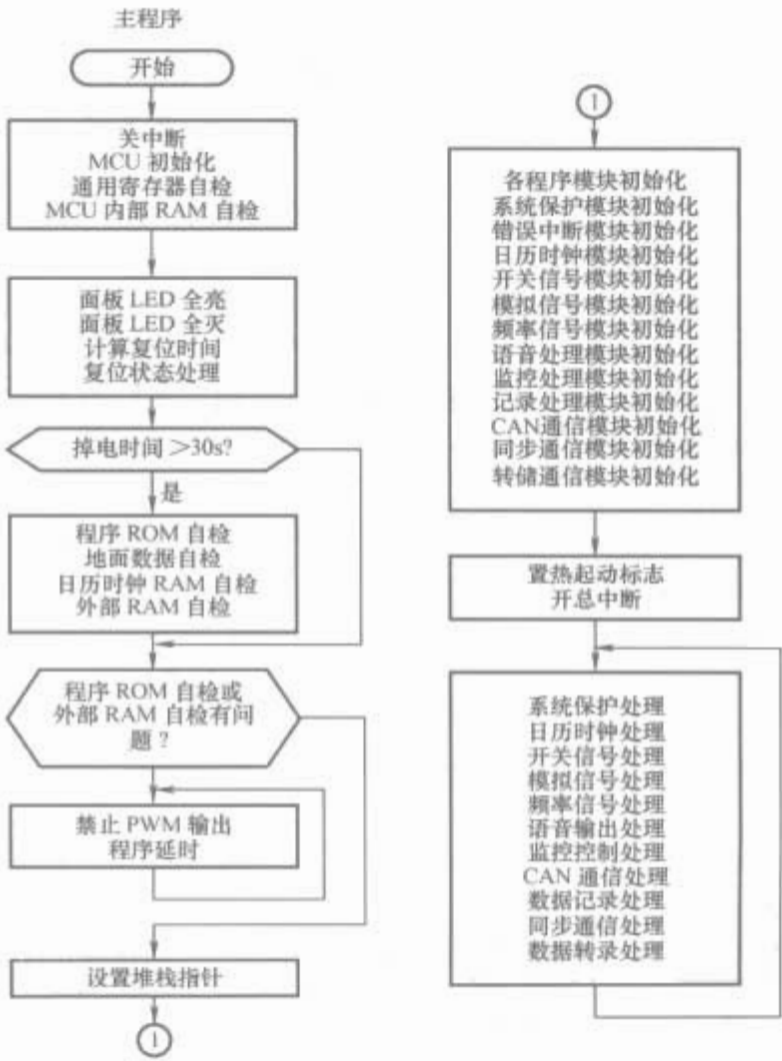


图 2.3-225 监控软件主程序流程

8.2.3.2 屏幕显示器

屏幕显示器是直接和乘务员交流信息的人机界面，它通过双路 CAN 总线与监控主机通信，在 10in 彩色液晶显示屏上显示图形、曲线及相关数据，并具有键盘扫描、IC 卡转储、语音提示、蜂鸣器报警等功能。其硬件结构如图 2.3-226 所示。



图 2.3-226 屏幕显示器硬件结构框图

屏幕显示器内部以 PC104 结构的 80486PC 主板为核心，

由主板、通信子板、底板、IC卡语音板、电源板、高压板等6块电路板和1块10in显示屏、扬声器、蜂鸣器及薄膜开关面板等组成。对外有2路CAN和1路RS485，可以与主机通信。有DOC电子盘用于存储地面数据，在运行过程中实时调出桥、遂、弯道等信息在相应的公里标处绘制出来。

屏幕显示器软件工作于DOS（或LINUX）操作系统下，软件采用C++语言编程。液晶显示分辨率为640×480点，使用同屏256色的SVGA显示方式，4MB动态内存，8~32MB固态电子盘。软件具有IC卡读写、语音控制、CAN总线通信以及扫描键盘等功能。

由于显示器的主要功能之一是实时显示主机发送的各种数据，因此必须保证显示的实时性。而系统的中断负担较重，不可能在中断服务中对数据进行处理和显示，所以在中断服务中对通信口传来的数据基本不作处理，只是简单地分类放入各自的缓冲区，由主程序循环对缓冲区的数据进行处理。为充分发挥图形显示的优点，本软件在人机接口的设计上尽量引入人性化的设计，显示上采用了类似Windows操作系统的窗口风格，特别是在转储器等功能上引入进度条的显示方式，工作进度一目了然。多窗口的显示模式也使屏幕显示的内容更为丰富，作为弹出式的窗口，保证了主显示画面的突出。

显示器软件结构框图如图2.3-227所示。

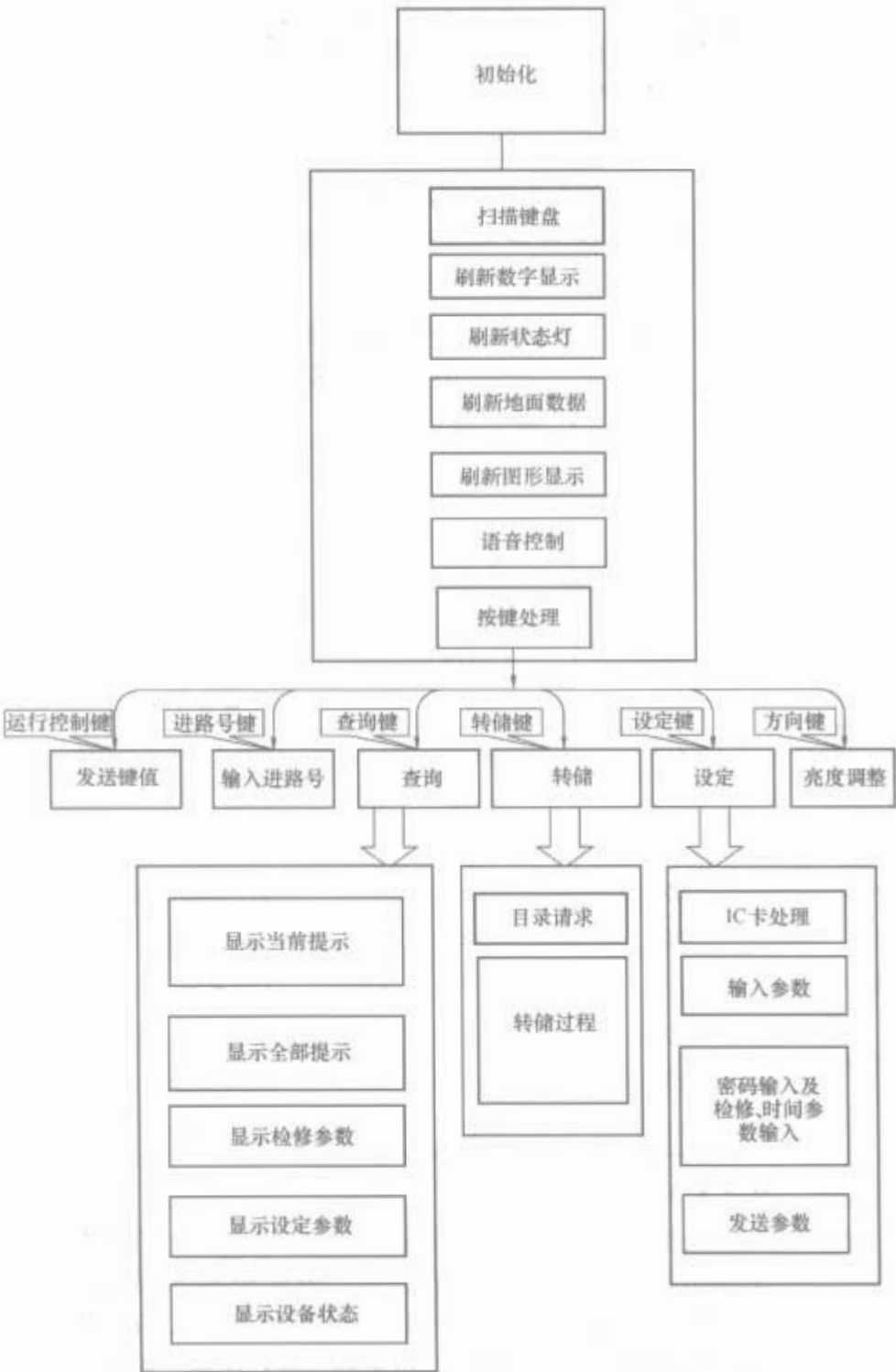


图 2.3-227 显示器软件结构框图

监控装置操作类别、其地面计算机网络基本配置及地面处理的数据流向分别见图2.3-228、图2.3-229和图2.3-230。

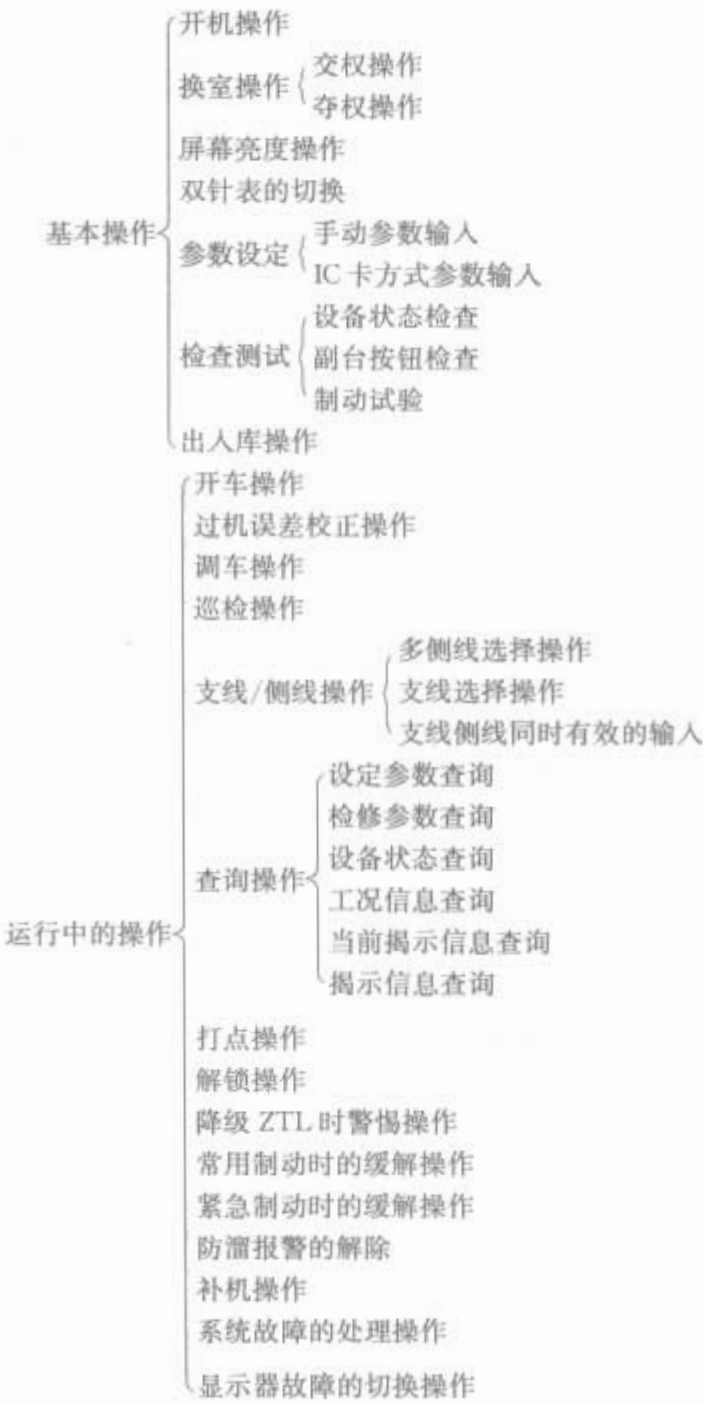


图 2.3-228 监控装置操作类别

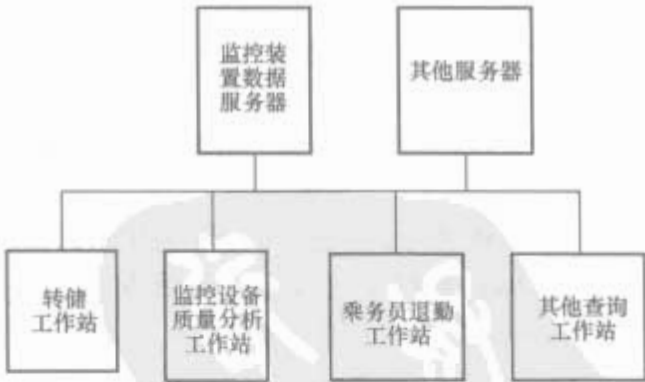


图 2.3-229 地面计算机网络的基本配置

8.3 机车安全信息综合监测装置

近年来，一些与机车运行有关的辅助安全信息的检测及数据传输设备已相继问世，并开始试验或局部运用，如轨道动态检测设备、弓网检测设备、无线列调语音录音设备、TMIS及DMIS列车运行信息传输设备等。但这些设备分别由不同的研制单位生产或试制，自成一体，在机车上分散安装，系统性不强，而且没有与列车运行的时间、公里标和速度等信息相结合，致使记录的信息可用性差，不

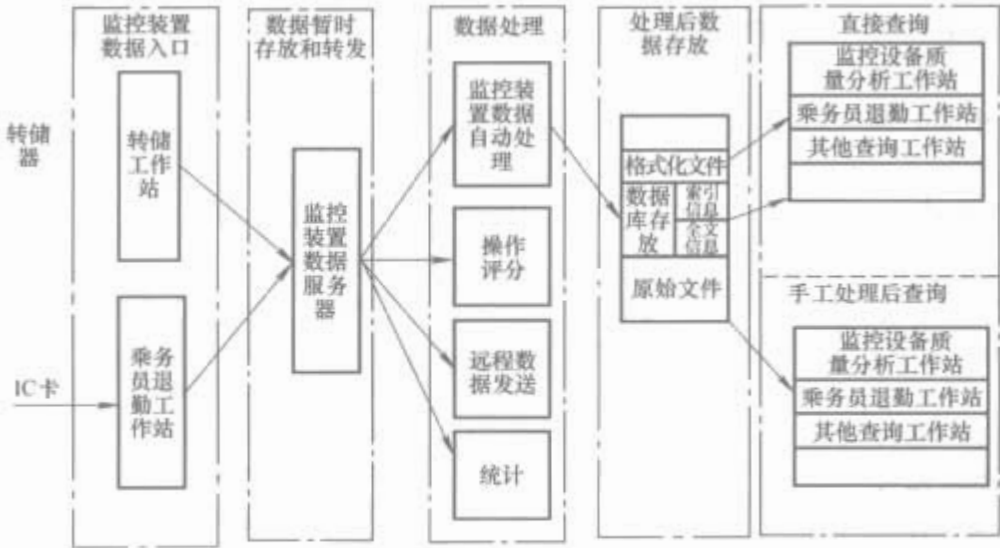


图 2.3-230 地面处理的数据流向图

便于分析和统一管理。很有必要将这些设备集中化、系统化，并建立统一的工作平台。为此，机车安全信息综合监测装置（以下简称监测装置）应运而生。该装置将各检测设备以标准模块单元置于工作平台中，由该工作平台中的通信记录单元一方面从监控装置获取时间、公里标、速度和车次等信息并传输给这些监测装置；另一方面综合各功能模块单元检测到的重大故障信息进行记录，可用监控装置转储器进行记录数据的转储，并利用其地面处理软件进行分析处理和数据管理。该装置既解决了所有检测信息以统一时间、公里标作为基准坐标记录的问题，又解决了重大故障信息集中数据转储、分析管理问题。

8.3.1 基本配置

8.3.1.1 主要功能及特点

监测装置以电源单元和通信记录单元作为基本配置，主要有以下功能：

(1) 串行通信功能。监测装置内通信记录单元能通过 RS485 串行通信方式从监控装置获取年月日、时分秒、公里标、运行速度、机车号、车次、车种、区段号、车站号、司机号、副司机号、列车编组等信息，并能将这些信息通过另一个 RS485 接口周期地传送到装置内各功能单元。各功能单元经过分析判断，将要求记录的信息返回给通信记录单元进行记录。

(2) 记录功能。监测装置内通信记录单元能以统一时间、公里标作为坐标基准，实时记录各检测单元反馈的信息，数据记录格式与监控装置的数据记录格式相似，便于转储与分析。

(3) 数据转储功能。通信记录单元记录的信息可以利用监控装置转储器通过 RS232 串行通信方式进行数据转储，且预留有与可能应用的大容量 IC 卡设备通信的 RS485 接口。

(4) 数据分析处理功能。装置记录的信息通过转储器输送到地面微机后，可以利用监控装置地面分析处理软件（增加对各功能单元的事件记录项目，但与原软件兼容）进行地面分析和数据管理。

监测装置的主要特点是：

(1) 采用 4U 标准机箱及插件单元式结构，既符合开放式工作平台结构的要求，也便于标准化、模块化，有利于检测、维护、功能扩充和规范管理。

(2) 为开放式平台结构，各功能单元采用统一的硬件规范和软件通信协议，易于对功能单元的合作开发和功能扩充。

8.3.1.2 组成结构

以 TAX2 型监测装置为例进行介绍。

监测装置采用符合 GB/T 19520.3—2004 《电子设备机械结构 486.6mm (19in) 系列机械结构尺寸 第 3 部分：插箱及其插件》机械尺寸要求的 4U 标准机箱及插件单元式结构。机箱面板宽度为 60R。它以电源单元、通信记录单元作为基本单元配置。其他已开发的功能单元有 TMIS 单元、轨道检测单元、弓网检测单元、DMIS 单元、语音录音单元。另外，预留 4 个单元位置用于备用功能单元的扩展。机箱各单元配置见图 2.3-231。

监测装置中轨道检测单元、弓网检测单元、TMIS 单元、DMIS 单元、语音录音单元和预留的 4 个备用单元 48 芯插头中的 DBZ8~DBZ14，



图 2.3-231 TAX2 型监测装置前面板布置示意

共 12 个引脚作为专用引脚用于对外引线。各引脚定义因单元不同而不同；其余引脚采用标准定义，各单元完全一致。具体定义见表 2.3-98 中的有关说明。

表 2.3-98 各检测单元电源及通信线 48 芯插头
引脚标准定义

引脚号	定义标志	含 义
DBZ2	+110V 地	110V 电源“地”
DBZ4	+110V	110V 电源“+”
DBZ6	备用	
DBZ16	备用	
D18	COMA	通信线 A
B18	COMB	通信线 B
Z18	COM 地	通信线地（通信第 3 导体）
D20	+24V	24V 电源“+”
Z20	24V 地	24V 电源“地”
DBZ22	15V 地	15V 电源“地”
DBZ24	+5V	5V 电源“+”
DBZ26	+15V	15V 电源“+”
DBZ28	-12V	-12V 电源“+”
DBZ30	+12V	+12V 电源“+”
DBZ32	GND	5V、±12V 电源公用地

8.3.1.3 基本原理

监测装置系统结构框图如图 2.3-232 所示。装置内部采取由电源单元集中供电的方式，由电源单元提供 +5V、±12V、+15V、+24V、+110V 电源给各单元的电路及其相关外部设备（如传感器、机车标签等）供电。各单元选用任何一种电源均必须采取 DC-DC 变换等方式与系统电源隔

离，以提高系统电源工作的可靠性。通信记录单元为监测装置的核心，通过它获取监控装置的运行信息，完成对各功能单元反馈信息的记录及对外数据的转储功能。监测装置中除电源单元外，其余各单元均带有单片微机 and 通信接口。因此，本装置是一个带有多级串行通信的多计算机系统。下面重点介绍装置基本配置单元的基本原理。

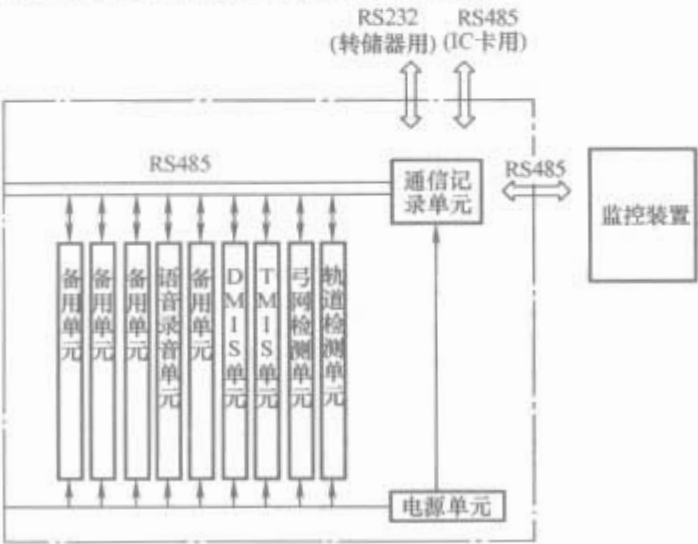


图 2.3-232 TAX2 型监测装置系统结构框图

(1) 通信记录单元。通信记录单元的核心器件为 8 位单片机 80C320。该单元主要设有 80C320 单片机、28SF040 FLASH 存储器、MAX1480 和 TSC232 串行通信接口、DS1232 电源电压监视等电路。由 48 芯插头并通过机箱内母板印制线与其他各单元相联系，通过机箱后背板专用插座与监控装置通信。其原理框图如图 2.3-233 所示。

(2) 各功能单元接口、功能及原理。在本装置中，各功能单元均采用电源隔离、通信接口隔离和对外输入/输出隔离技术，以提高装置的可靠性、安全性和抗干扰性。各单元面板上均设有指示灯或测试孔，以用于各单元的工作状态、故障状态指示及对某些模拟量信号的测量，便于对装置的检测及维护。各单元功能及原理如下：

- 1) 轨道检测单元。用于机车运行时动态检测轨道的技术状况，其基本原理见 8.3.3。
- 2) 弓网检测单元。用于电力机车运行时动态检测弓网的技术状况，其基本原理见 8.3.2。
- 3) TMIS 单元。又称机车标签写入单元，它的主要功能是从监控装置获取的车次、车号、本/补、客/货、时

间、公里标等列车运行信息实时传送给车号识别系统中的机车标签设备，再由车号自动识别系统的地面识别设备和管理设备传送给 TMIS 系统，完成 TMIS 系统对机车的动态跟踪管理。

4) DMIS 单元。它是 DMIS 工程车次号校核系统的车次等信息的传输源。它的主要功能是从监控装置获取的列车运行的时间、公里标、车次、信号机编号和速度等信息经调制后，通过机车电台传输到车站地面电台，再传送给 DMIS 系统，完成对机车的调度管理。

5) 语音录音单元。它是无线列调语音录音装置的车载设备，其基本原理参见 8.3.5。

6) 备用单元。预留给尚待开发的功能单元。

8.3.2 弓网状态检测装置

弓网状态检测装置（以下简称装置）是一种安装在机车上的接触网状态动态参数自动检测系统。该系统安装在运行的机车上，对接触网导线拉出值、硬点冲击、导线高度、电弧和接触压力等参数进行动态实时检测，并记录对应的公里标（杆号）；当这些参数的检测值超过预设门槛值时，系统自动记录超限数据信息和故障前后几秒钟内的弓网状态图像并通过 GPRS 无线方式实时传输到地面接收系统；经过地面软件的处理分析，接触网运行状态得到实时有效的监控。我国目前使用的弓网状态检测装置是 GW500 系列。

8.3.2.1 主要功能

- (1) 对接触导线拉出值超限的自动检测并记录。
- (2) 对受电弓所受硬点冲击超限的自动检测并记录。
- (3) 对接触网导线高度超限（或定量）的自动检测并记录。
- (4) 对受电弓与接触网接触力的自动检测并记录。
- (5) 对弓网运行状态数据和图像实时如无线传输。
- (6) 对弓网状态进行全程录像或故障点录像。
- (7) 故障点与机车公里标相对应，并自动记录。
- (8) 数据图像的转储、地面软件分析、数据保存并信息共享。

8.3.2.2 组成原理

按照物理设备组成共分为 4 个部分：车顶高压部分、车顶低压部分、车内部分和地面转储数据处理部分。

按照系统功能组成为 3 个子系统：接触网几何参数（拉出值、导线高度）及硬点冲击检测子系统、弓网接触力检测子系统和电弧探测及分析子系统。

弓网状态检测装置组成示意图如图 2.3-234 所示，装置车顶高压侧部分由独立的浮充电供电系统供电，即在机车运行中，与接触网 25kV 等电位的拉出值传感器、硬点冲击传感器、压力传感器和数据采集转换发射机等由浮充电电源提供能源。当传感器检测到拉出值、硬点冲击超限和弓网接触力的信号时，其信号经光电式的数据采集转换发射机传输到位于低压侧的接收机。

安装于车顶（与车体等电位）的导高检测传感器、电弧探测器、摄像机等检测到的信号以及数据接收机接收到的信号都通过信号电缆传输给机车内的数据采集处理主机，采集处理主机再通过信号电缆传输给装置的弓网检测单元，弓网检测单元通过 RS485 通信接口采集

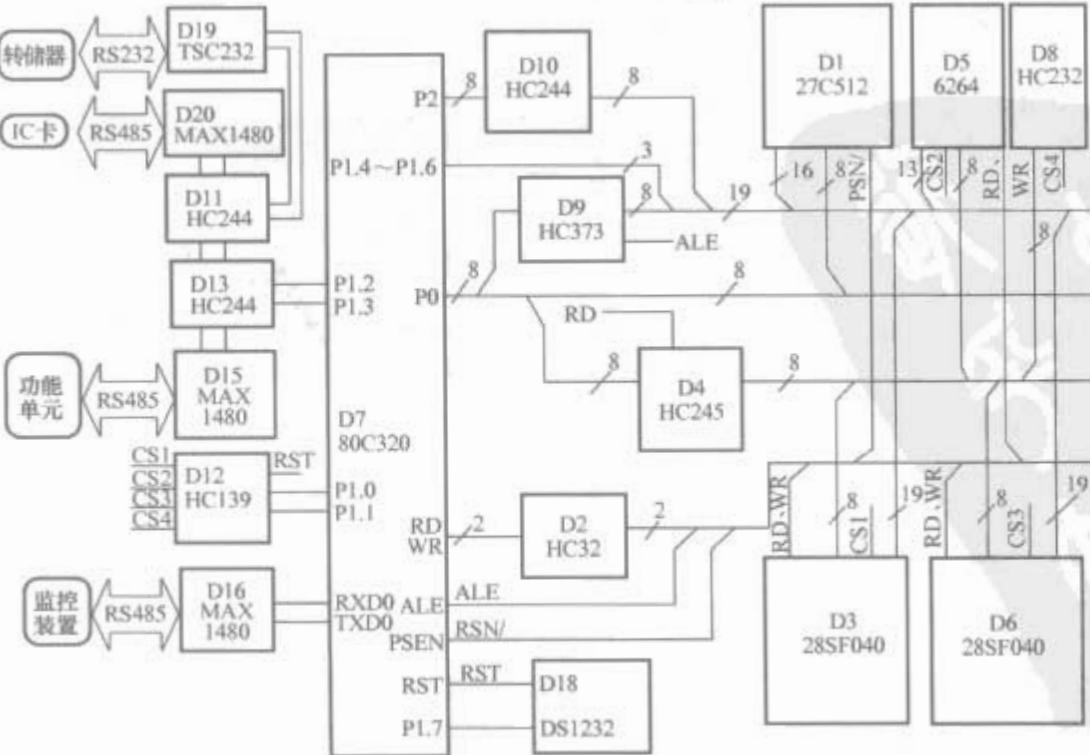


图 2.3-233 通信记录单元原理框图

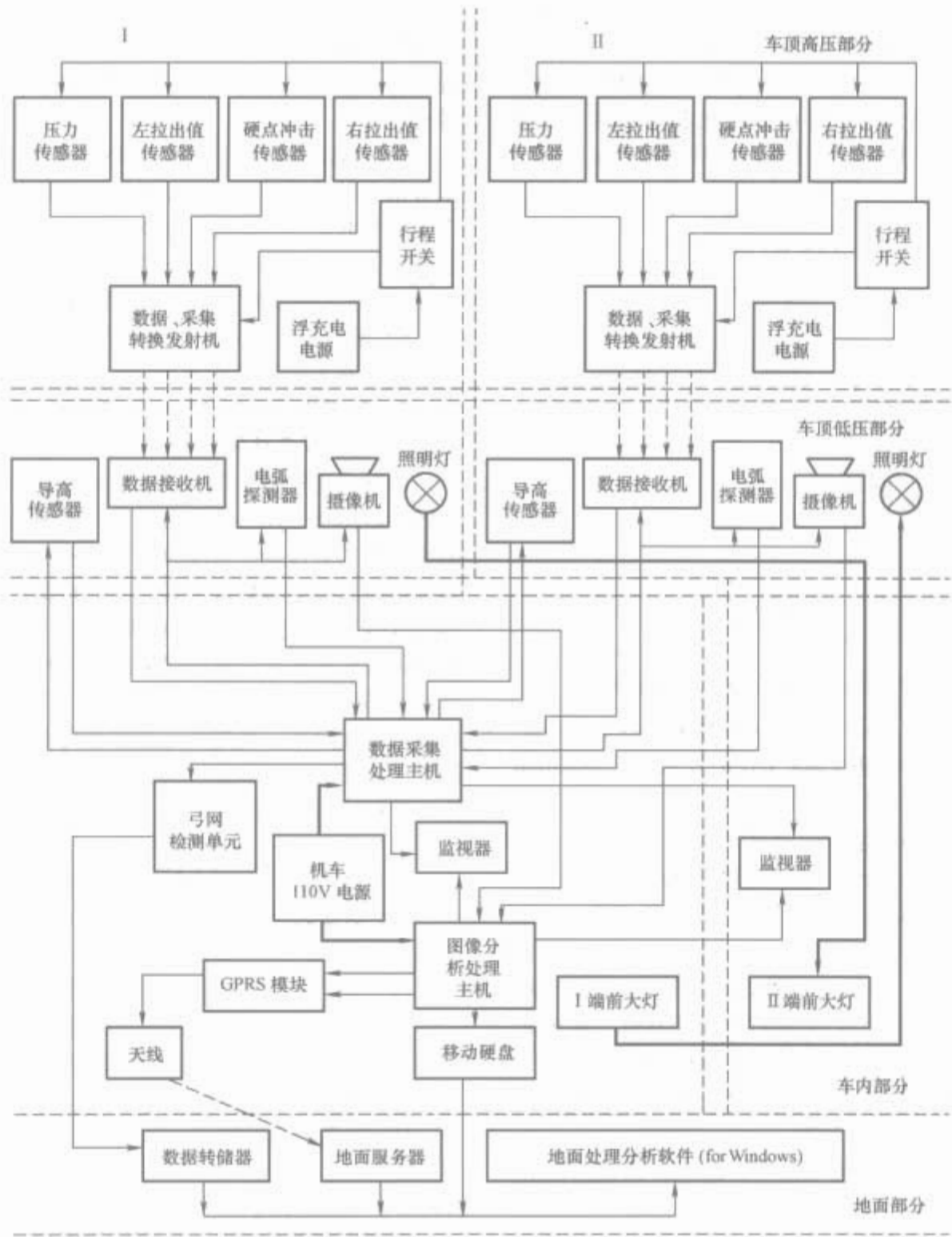


图 2.3-234 弓网状态检测装置组成示意图

监控装置的基本信息（时间、公里标、速度、机车号、车次和司机号等），并与数据采集处理主机传输的信号经过处理后记录存储。同时，弓网检测单元把处理后的信号通过 RS485 通信接口传输给图像分析处理主机，与位于车顶两端的摄像机图像视频信号相叠加，由图像分析处理主机自动截取发生故障前后几秒钟的弓网状态图像，记录并保存到移动硬盘上。在“弓网检测单元”中记录的故障数据、图像分析处理主机中记录的图像信息可以在机车回段后用转储器和移动硬盘导入地面软件分析，也可以在机车运行过程中，通过 GPRS 无线数字传到地面服务器后再用地面软件分析。

车顶摄像机视频信号可以在司机室的液晶监视器上显示，方便乘务员监控受电弓状态。

8.3.2.3 现场应用效果

(1) 拉出值超限效果图。如图 2.3-235 所示，从左到右分别记录拉出标志、司机代码、车次、时间、车速、公里标、端位。

(2) 硬点超限效果图。如图 2.3-236 所示，从左到右分别记录硬点标志、司机代码、车次、时间、车速、公里标、端位。

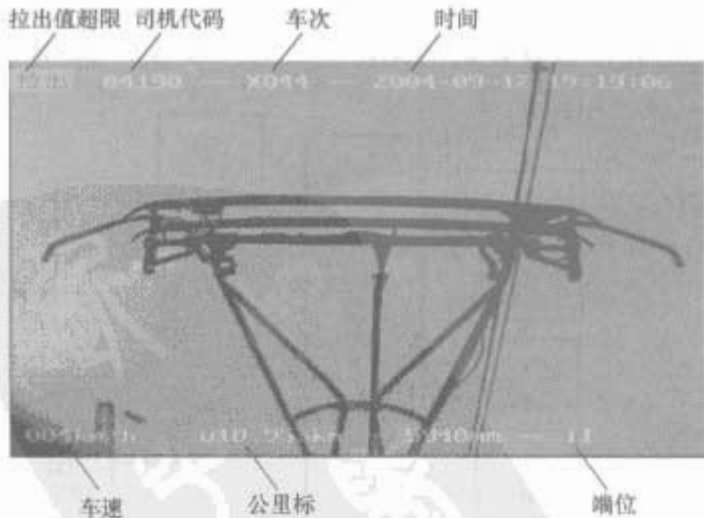


图 2.3-235 拉出值超限效果图

8.3.2.4 安装注意事项

- (1) 不能改变机车的结构，不影响机车的安全运行。
- (2) 便于机车的操作和检修。
- (3) 车顶安装部件高低压安全隔离距离应大于 300mm。
- (4) 系统主机应安装在车内，便于操作和观察。
- (5) 高压侧采用蓄电池供电或浮充电供电装置，数据通

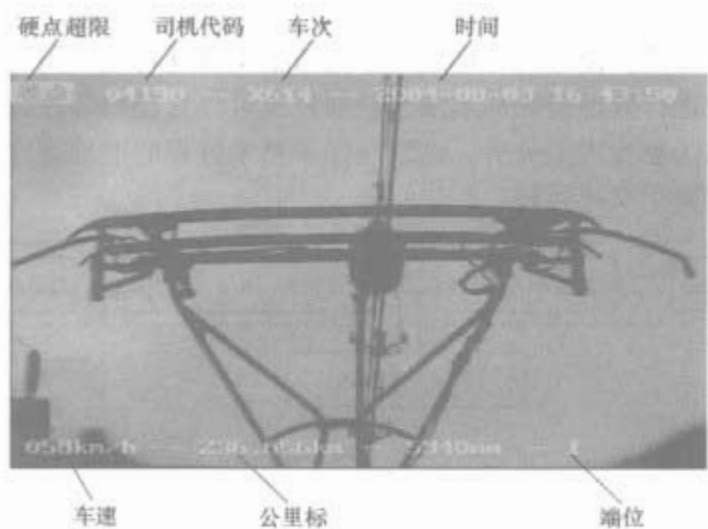


图 2.3-236 硬点超限效果图

- 过无线隔离传输。
- (6) 机车车顶若是 2 套主断路器控制器，数据发射采用 2 对数据发射机隔离传输装置。
 - (7) 数据发射器和接收器的高低压距离应在 700～900 mm。
 - (8) 故障录像工控机安装在司机室内，便于操作和取数据及图像。
 - (9) 监视器安装在副驾驶台上。
 - (10) 车顶探照灯电源与机车头灯并联。
 - (11) 受电弓在运行中的视场应始终在监视器画面内。

8.3.3 轨道状态检测装置

轨道状态检测装置（以下简称装置）是采用光电检测手段动态检测轨道不平顺状态的装置。该装置采用红外线光源和 CCD（Charge-Coupled Device）作为传感器，分别安装于机车同一转向架的两个轮轴上，机车左右各安装一套发射和接收装置，同时采集左右轨道不平顺状态数据。然后 CCD 将采集到的数据即时发送到插在 TAX2 箱内的轨道检测单元板，由轨道检测单元板对所接收到的数据进行筛选，同时轨道检测单元板与 TAX2 进行通信，读取机车的时间、速度、公里标，与 CCD 数据一起写入 Flash 缓存，形成反映线路状况的原始数据，以特定的文件名保存下来。转储器将原始数据转储到地面微机后，由地面处理软件对原始数据进行处理、分析、统计，给出轨道故障点的位置（公里标）、类型（三角坑、水平不平顺、高低不平顺）、级别、数值（深度、基长）以及当时的车次、机车号、时间、速度等信息，形成报表，可以打印，也可以保存。此外，地面处理软件还具有描绘曲线、打印曲线、统计比选等功能，方便用户最大限度地利用动态检测的数据，提高工作效率。

8.3.3.1 组成

装置主要由以下 4 部分组成：红外线光源、线阵 CCD 接收装置、轨道检测单元板、转储器、地面处理系统，其组成结构框图如图 2.3-237 所示。

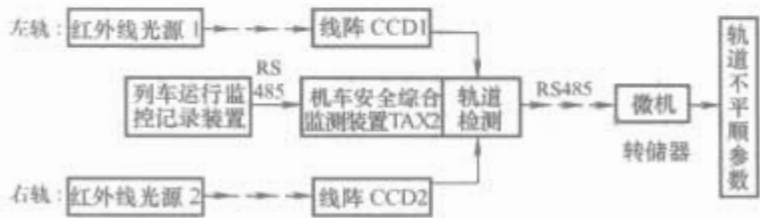


图 2.3-237 轨道检测装置组成结构框图

- (1) 红外线光源。形成宽度一定（3mm）、亮度一致的红外线光源，便于在线阵 CCD 接收装置上成像。

(2) 线阵 CCD 接收装置。将红外光源聚焦后成像于线阵 CCD 上，CCD 根据其成像位置变化进行采样，输出不同的数字信号，经放大处理后输送至轨道检测单元板采集处理。

(3) 轨道检测单元板。轨道检测单元板以采集卡的形式插入 TAX2 综合监测装置中，在高速接收并简单处理 CCD 数字信号的同时，通过 RS485 通信方式接收 TAX2 平台的公里标、时间、速度等相关机车信息，形成一定格式的原始文件并保存在缓存里，文件以车次和司机号命名，日期为文件扩展名。例如，文件 217620277.9e 表示车次为 K762，司机号为 0277，日期为 9 月 14 日。

(4) 转储器。转储器主要起到连接地面和机车的作用，将轨道检测单元板缓存中的原始数据转储到地面微机中，转储完毕后，将轨道检测单元板缓存中的数据清空，以便存储下一次的原始数据。

(5) 地面处理系统。转储器将记录的初始文件转储到地面微机中，地面处理系统对之进行处理，便可得到轨道超限故障点相关数据报表（如故障点类型、数值、故障点相关公里标、机车速度等）及全程轨道状态曲线。同时，可对不同机车、车次进行故障点比选，统计出故障点的重复率，提高检测系统的准确性和稳定性。

8.3.3.2 技术参数

轨道检测装置技术参数见表 2.3-99。

参 数	指 标
三角坑检测（级）	3、4（基长 2～18m）
水平不平顺检测（级）	3、4
高低不平顺检测（级）	3、4
精度（mm）	
测量精度（mm）	<0.5
垂直位移测量范围（mm）	±60
机车运行速度（km/h）	3～300
红外线光源	
光源尺寸（mm×mm）	200×3
直流电压（V）	12
电流（A）	60×0.020×2=2.4
线阵 CCD	
焦距（mm）	135
直流电压（V）	12
电流（A）	0.5
采集速度（帧/s）	标准 200，最大可达 500
直流电源	
电压（V）	110，12，5
电流（A）	0.5
环境温度①（℃）	-30～+60
相对湿度①（%）	<90
海拔（m）	>4000

① 室外设备具有防雨、防晒、抗震、抗干扰的性能。

8.3.3.3 工作原理

(1) 测量原理。采用 2m 弦测法，将红外线光源和线阵 CCD 分别固定于机车轮对的 2 个轴箱上，二者距离为 2m，因为轴箱和车轮为刚性连接，当轮对的 2 个轮子产生高低方向的位移时，红外光源照到 CCD 不同的像元上，随着机车的运动，轨道的不平顺将造成轮对前后两轮的高低不平，反映到 CCD 是感光像元几何位置的变化，如图 2.3-238 和图

2.3-239 所示。左轨和右轨轮对上各安装一套红外光源和 CCD，两股钢轨的高低起伏便能通过 CCD 采集的数据反映出来。

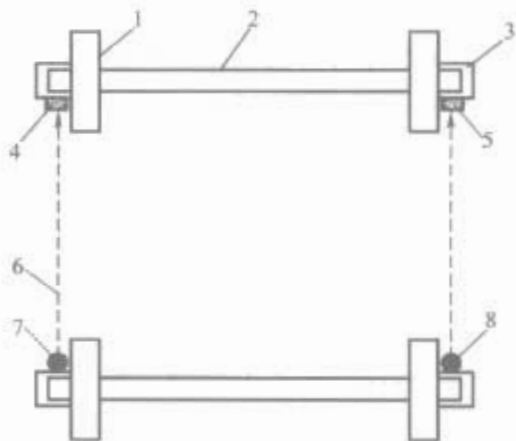


图 2.3-238 轨道检测装置光电单元的安装
1—车轮；2—轮轴；3—轴箱；4—CCD1；
5—CCD2；6—红外光线；7—红外光源 1；
8—红外光源 2

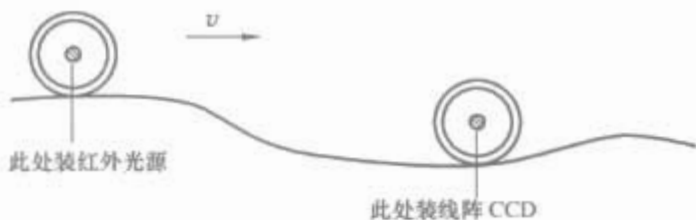


图 2.3-239 测量原理图

当机车在平顺轨道上行驶时，红外光源在 CCD 上的成像位置为基准点位置 y_0 ，如图 2.3-240(a)所示。当前轮驶入不平顺区域(例如凹坑)时，红外光源在 CCD 上的成像位置为 y_1 ，相对于基准点发生了位移，如图 2.3-240(b)所示，此位移量反映了轨道的不平顺状况。光斑位置通过编码及信号处理将转换为不同的电信号输出，2 组 CCD 的信号分别经数据采集板送到计算机中，处理后得到 x 方向和 y 方向的光斑位置曲线，如图 2.3-240(c)所示。由于红外光源和 CCD 分别安装在机车轮轴的轴箱上，因此，此光斑位置曲线代表的是轮轴运行曲线。作为动态检测，这种变化是连续的，因此要对其进行采样以得到量化值。

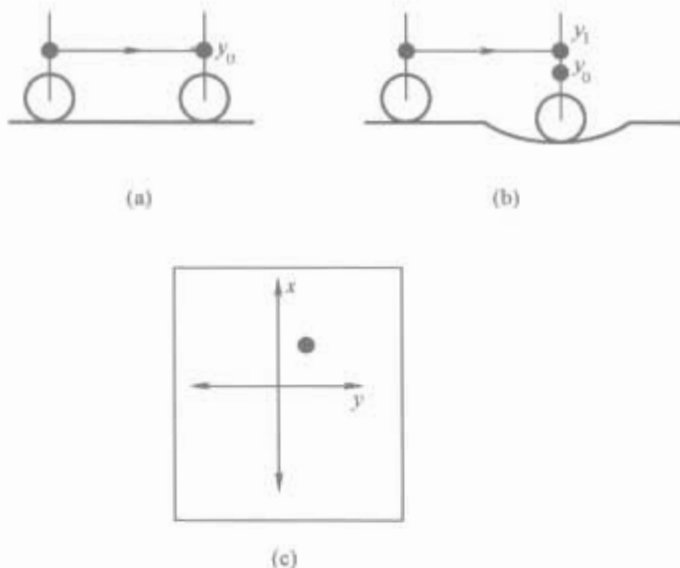


图 2.3-240 光斑位置图

(a) 平顺轨道上光斑位置；(b) 不平顺轨道上光斑位置；
(c) 光斑在 CCD 上的位置

(2) 数据处理流程。系统处理流程如图 2.3-241 所示。首先要用软件对 CCD 进行标定，并作一些必要的参数设置，然后才开始采集数据。同时起动系统与 TAX2 的通信，读

取时间、速度和公里标，与 CCD 采集的数据共同形成原始数据文件和曲线。对形成的原始数据文件既可以采用编制的软件进行数据提取和超限点判断，也可以直接打印原始文件和曲线进行人工分析，这就确保了整个过程的准确运作，同时也易于发现问题，解决问题。

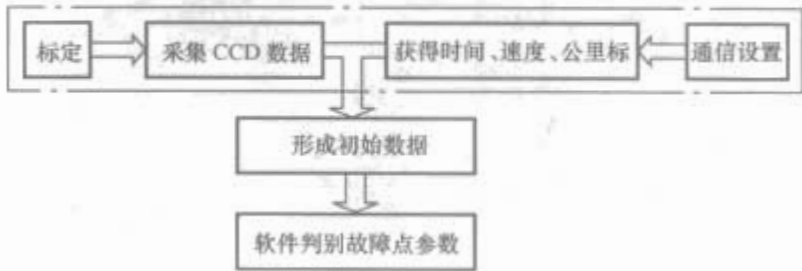


图 2.3-241 数据处理流程

- ① CCD 高速采集左右轨道不平顺状态数据，转换成 RS485 信号传输至 TAX2 轨道检测单元板。
- ② 轨道检测单元板同时与 2 个 CCD 及 TAX2 主板通信，自动判断并存储超限故障点及前后 30m 相关数据。
- ③ 通过转储器将超限故障点数据文件转储至地面计算机。
- ④ 通过地面处理软件对数据文件进行处理，可自动判别轨道不平顺状态(如三角坑、水平不平顺、高低不平顺)，给出超限故障点的相关车次、日期、时间、公里标、机车速度、故障点类型、数值(如基长、超限值)等信息。
- ⑤ 对某一区段、时间段不同机车、车次数据进行比选，可统计出故障点的重复点及重复率，进而整体评价各区段的轨道质量指数(track quality index, TQI)。

(3) 地面处理系统工作原理。根据对各种类型故障的理论分析，数据分析处理软件对不同的故障类型建立不同的数学模型，采用不同的算法进行识别和判断。系统能够按使用者要求找出具体线路、具体区间的故障点，并给出其公里标、类型、级别和相应数值。

工务上，高低不平顺是指一股钢轨踏面在垂直面上的不平顺程度。水平不平顺是指面向线路终点，以左股钢轨为基准股，左股高于右股为正，反之为负。三角坑则是指在 18m 范围内，两股钢轨存在 3 个以上的凹坑或突起，若以左股为基准股，在左股上出现负—正—负或正—负—正的交替水平差时就叫三角坑。高低不平顺描述的是单股轨道的不平顺，水平不平顺描述的是两股钢轨间的不平顺，而三角坑则是描述轨道的扭曲状态，因此，既涉及了两股钢轨的水平不平顺，也涉及了高低不平顺。因此，对这 3 种参数的判断需要 3 组数据，即左轨高度、右轨高度和两轨高度差。

根据工务上的定义，对轨道不平顺状态的理论分析以及多次实际试验所得的数据得出软件中的判断条件如下：

- (1) 三角坑的判断条件为：
 - 1) 三角坑深度为两轨高差最大值和最小值之差。
 - 2) 三角坑深度大于等级门限值。
 - 3) 两轨高差的最大值大于零，最小值小于零。
 - 4) 左轨道和右轨道的值在两轨高差最大值及最小值处均反号。
 - 5) 两轨高差最大值和最小值之间的距离大于 2m 小于 18m。
- (2) 水平不平顺判断条件为：
 - 1) 水平不平顺的深度为两轨高差绝对值的最大值。
 - 2) 水平不平顺的深度大于等级门限值。

3) 两轨高差的最大值大于零, 最小值小于零。

(3) 高低不平顺判断条件: 为避免和水平不平顺重复, 软件中高低不平顺反映的是对高和对坑的情况。

1) 非三角坑和水平不平顺。

2) 左轨道或右轨道的值大于等级门限值。

3) 在右轨最大值处左轨的值要大于门限值, 反之, 在左轨最大值处右轨的值也要大于门限值 (即对高或对坑)。

8.3.3.4 功能

(1) 实时、动态检测和记录轨道状态。

(2) 查询和打印全程轨道状态曲线, 故障点日报表, 区段、时间段报表, TQI 轨道质量指数综合报表等。

(3) 具有语音报警功能, 对严重的轨道病害及时报警。

(4) 软件参数设置功能, 包括基本参数设置和道岔库设置:

1) 基本参数设置。对各类故障阈值、扰动值、高差级值、检测区间、缺省目录等的设置。

2) 道岔库设置。对是否排除和标记道岔进行设置。

8.3.3.5 特点

(1) 该装置直接安装在运用机车上, 是一种实时、动态检测, 可随时、定期报告轨道状态参数。

(2) 该装置 CCD 安装在机车轮轴上, 是一种直接测量轮轴的运行轨迹曲线的方式, 可以定量给出轨道病害的数值、类型、级别、公里标, 相对于安装在车体上的加速度传感器的测量方法, 准确性和精度更高。

(3) 采用先进的光电检测技术结合红外滤波方式, 可靠性高, 抗干扰能力强。

(4) 该装置的检测方式不受机车运行速度的影响, 运行速度在 0~300km/h 内均能检测轨道状态。

(5) 检测结果较直观, 通过检测数据可以计算出轨道的水平、高低、三角坑、TQI 轨道质量指数、垂直和水平方向的加速度等参数, 并以报表形式输出。

(6) 可以根据所采集的原始数据将故障点曲线绘出、打印, 方便对轨道进行更直观、更深入的研究。

(7) CCD 检测、采集速度快, 可达 2ms/次, 在 300km/h 速度下, 每米可采集 4~5 个点。

(8) 轨道检测单元板存储容量大 (4~8MB), 保存时间长 (1 年以上)。

(9) Windows 界面下的应用软件, 界面更直观, 操作更简单, 功能更完善。

(10) CCD 与加速度传感器结合使用, 可提高检测的准确性和重复率。

8.3.4 走行部状态检测与故障诊断

铁路机车走行部的轴承、传动齿轮、车轮踏面处于恶劣的运行状态: 连续较长时间运转、环境恶劣、冲击频繁、振动剧烈。因此, 走行部的大事故多数是由于它们的损伤而引发的, 尤其是机车提速以来, 因为轴承破损引起的走行部故障更加突出。传统的方法是定期进行小修、辅修、中修和大修, 用肉眼和超声波探伤技术集中解决损伤的轮心、车轮的踏面、轴承、齿轮; 但由于故障早期的隐蔽性和在线运行的突发性, 小修、辅修时往往难以发现这些部件的早期损伤, 在两个中修期之间极有可能突发机破的大事故。

在机车运行中对走行部进行监视, 及早准确地找出故障点, 判断出受损部件位置及受损程度, 从而避免事故的发生, 是运行中进行安全监控, 解决系统故障诊断方法的有效措施。

目前广泛应用于机车走行部状态监测与故障诊断的设备有轴温报警装置 (以下简称轴报) 和机车走行部车载故障诊断系统 (以下简称诊断系统)。轴报是以单一的温度参数的变化为依据判断轴承的好坏, 由于超温是轴承损伤发展的最后阶段, 对于高速列车而言, 它会在十几分钟内突然超温报警, 起不到预防的作用; 而诊断系统通过组合传感器同时采集温度和振动冲击信号, 能检测出轴承、齿轮、踏面微小的裂纹、剥离、辗皮、电蚀等损伤, 提前预警。

8.3.4.1 诊断系统的结构

诊断系统主要由系统主机、接线盒、组合传感器、显示盒及连接电缆组成, 如图 2.3-242 所示。

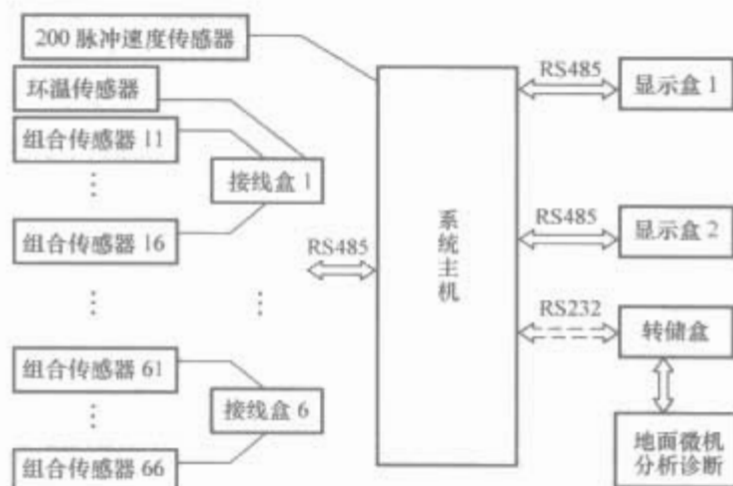


图 2.3-242 诊断系统框图

由于该系统在诊断故障频谱时要用到转速这个参数, 所以一定要引进一路轴端光电速度传感器的信号。

电源直接取自机车的直流 110V, 经主机内电源板转换成所需的各种直流电压。

8.3.4.2 性能和工作原理

对机车而言, 组合传感器安装在每个轴承接近外环的部位, 如 SS₇ 型电力机车安装 36 个组合传感器。通过组合传感器接收到的振动冲击信号在接线盒内汇总后, 经模拟总线进入主机; 经共振解调—A/D 转换—FFT 变换—故障频谱分析—主动专家故障诊断, 把重要的故障信息保存在主机内, 同时把紧急的故障信息通过显示盒向司机声光报警。保存的信息可以通过 U 盘, 也可以无线发送的形式转储到地面进行进一步分析处理。从组合传感器和环温传感器同时得到的温度信号通过另一条 RS485 总线进入主机, 处理原理与轴报相同。

诊断系统的核心技术在于冲击信号的处理和主动专家诊断软件。冲击信号的处理用到了电共振解调原理: 以机车牵引电动机轴承为例, 电动机运行中本来就存在很大的振动和噪声, 如图 2.3-243 所示, 即使轴承因故障产生了冲击, 但冲击的脉冲持续时间极短, 量值远小于常规振动, 特别是能

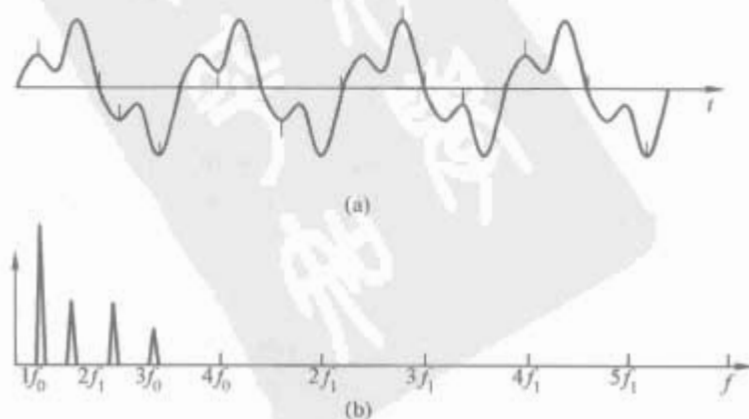


图 2.3-243 故障冲击与常规振动

(a) 电动机振动波形; (b) 电动机轴承冲击脉冲

量甚微，如图 2.3-243 (a) 所示，对它直接作 FFT 分析得到的低频谱图[见图 2.3-243(b)]中几乎看不到能表明轴承存在故障的特征。但由于轴承工作面的损伤引起的冲击是希望提取的，而这种冲击和机车的常规振动相比是微弱的，并且从经典的故障数学公式中可见，和旋转速度 (r/s) 成正比关系的冲击故障频率皆分布在 100Hz/s 左右，被强大的机车常规低频振动所淹没，能否提升有用的冲击信号是实现频谱分析的第一个难关。冲击理论表明，就一次冲击波而言，它具有广频特征，即在 0~250kHz 的频率范围内其幅值几乎不变化。利用这一可贵的特性，可以设计一个具有放大、滤波功能的高频电共振器，只放大冲击信号，不使低谱振动波通过，对于通过电共振器的单个冲击波而言，它变成了一个高频的衰减波，如图 2.3-244 中 B 曲线所示。作为研究的对象是重复出现的冲击次数，对单个的冲击波的内部结构并不感兴趣，因此，只要把每个冲击波的包络波检出来就行了，这个过程叫电共振解调。

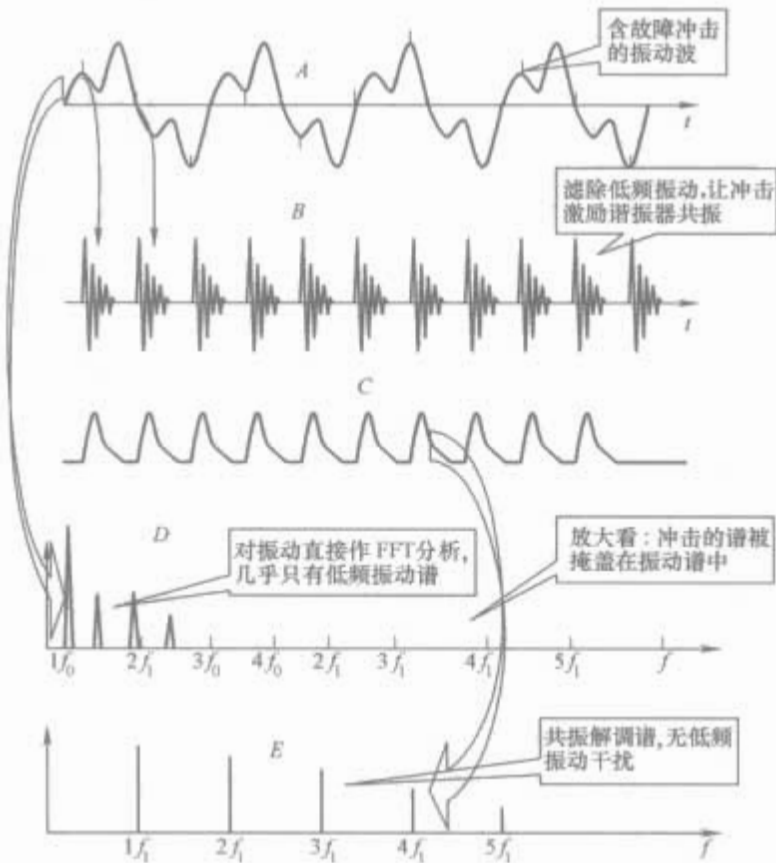


图 2.3-244 共振解调原理示意图

经共振 (曲线 B) 解调 (曲线 C) 后再作 FFT 分析，得到的谱图 (曲线 E) 就能清晰地看到故障谱线。

车载的诊断软件是一个主动的专家诊断系统，它在轴承各类故障数学模型的基础上，融入大量实践总结出的各类判据。无须“学习”，即可作出诊断结论。直接测量共振解调波的幅度，可以估量损伤冲击的大小，应用式 (2.3-223) 运算得到冲击的级差分贝值，可消除车速的影响，即可简易诊断出轴承 (图 2.3-245) 的好坏，即

$$A=20\lg \frac{2000S_v}{ND^{0.6}} \quad (\text{dB}) \quad (2.3-223)$$

式中： S_v 为共振解调波的峰值幅度，即冲击值； D 为所述故障源所在轴的直径，mm； N 为所述故障所在的转速值，r/min。

研制的共振解调精密诊断技术比较可靠，能从信号中区分电动机轴承、大齿轮、小齿轮、踏面故障，这是因为这些部件有固定的转动关系，轴承中的所有零件在运行中皆有准确的几何学和运动学规律，可以建立确定的、以轴承等几何参数为自变量的函数关系，从而可以建立一系列的公式来描

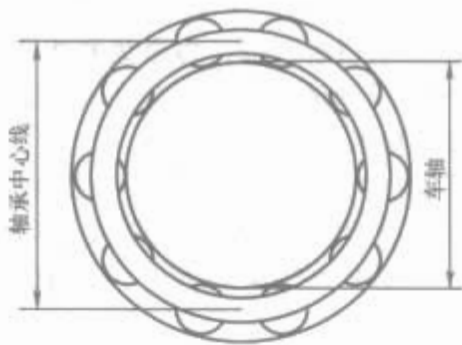


图 2.3-245 轴承示意图

述各零部件的故障发生频率。

(1) 外环故障基本特征频率为

$$f_{out}=\frac{D_0-d\cos B}{2D_0}Zf_n \quad (2.3-224)$$

式中： D_0 为轴承的中径 (滚动体接圆直径)，mm； d 为滚动体直径，mm； Z 为滚动体的数量； B 为滚动体的接触角； f_n 为轴承所在轴的转动频率，Hz。

(2) 内环故障的特征频率为

$$f_{in}=\frac{D_0+d\cos B}{2D_0}Zf_n \quad (2.3-225)$$

(3) 滚子故障的特征频率为

$$f_r=\frac{D_0^2-(d\cos B)^2}{2D_0d\cos B}f_n \quad (2.3-226)$$

(4) 轴上齿轮的故障特征频率为

$$f_j=f_n \quad (2.3-227)$$

当故障冲击值达到一定的分贝值时，就会显示报警。这个报警值可以设定。系统出厂默认值见表 2.3-100。

表 2.3-100 系统报警默认值						dB
参数项	报警类型	默认值	参数项	报警类型	默认值	
C1	预留	60	C9	踏面故障	60	
C2	保外	50	C10	综合故障	65	
C3	保内	50	C11	电极端齿轮	50	
C4	外环	55	C12	轴箱端齿轮	60	
C5	内环	50	C13	初级诊断	60	
C6	滚子端面	50	C14	绝对温度	90	
C7	滚子工作面	50	C15	相对温度	55	
C8	精度消失	60				

8.3.4.3 诊断系统的技术指标

诊断系统的技术指标见表 2.3-101。

表 2.3-101 诊断系统的技术指标			
参 数		指 标	
确诊率 (%)		≥97	
误诊率 (%)		≤3	
漏诊率 (%)		≈0	
温度测量误差 (℃)		±2	
振动冲击误差 (dB)		±2	
温度检测范围 (℃)		-55~125	
显示分辨率 (℃)		0.1	
振动冲击测量范围 (dB)		20~99	
显示分辨率 (dB)		1	

续表

参 数	指 标
故障冲击检测灵敏度 (mV/SV)	1
故障冲击检测范围 (SV)	5~5000
环境温度 (℃)	-40~+70
直流输入电压 (V)	72~144
组合传感器	
抗振动加速度 (m/s ²)	100g
工作温度 (℃)	-55~125
海拔 (m)	≤5000

8.3.5 语音录音装置

列车无线调度电话机车电台语音记录装置（简称语音记录装置）主要用于对乘务员与车站值班员电话联系时的自动录音，并可在录音测试仪或录音装置地面控制软件的控制下进行语音检索、回放，真实地再现列车运行中的呼唤应答情况，可用来有效分析行车事故，为机务部门和运输部门的科学管理提供新的技术手段。该装置安装在机车安全信息综合监测装置主机箱中。在行车过程中，语音记录装置一方面执行录音工作，一方面实时接收监控装置发出的运行数据，使语音数据与运行数据在时间、公里标上同步。

8.3.5.1 组成

语音记录装置由车载设备、测试设备和地面回放设备组成。车载设备主要包括装在监测装置主机箱中的语音记录单元；测试设备包括录音测试仪；地面回放设备包括录音装置地面控制器、微机通信线、音箱、微机及微机处理软件。装置的组成示意如图 2.3-246 所示。

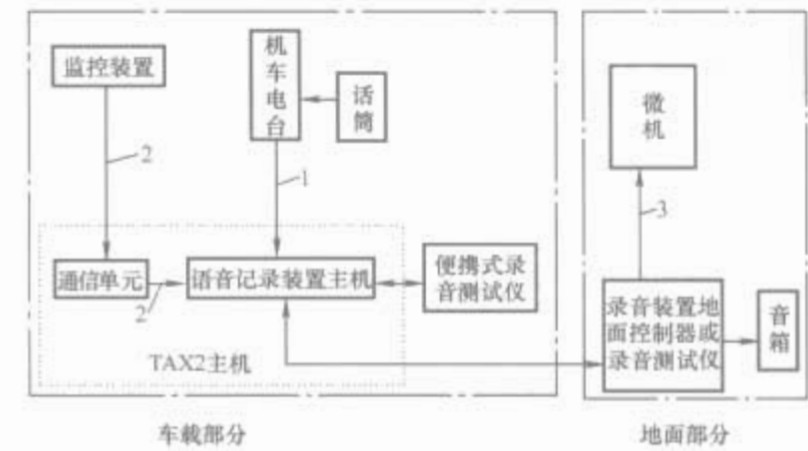


图 2.3-246 语音记录装置组成示意图
1—语音信号；2—监控装置提供的时间、公里标信息；3—语音检索、回放信号

(1) 语音记录装置是车载设备，它装在综合监测装置主机箱中，将机车乘务员通过列车无线电调度电话进行的收、发语音信号，按数字压缩形式，并以从监控装置获取的时间、公里标作为基准坐标进行存储记录，形成语音文件。

(2) 便携式录音测试仪可在机车上对语音记录装置进行测试，还原回放语音信号，并可转储语音数据。

(3) 语音记录装置可从监测装置主机箱中拔出，拿到地面通过录音装置地面控制器、微机通信线与地面微机相连，进行语音文件检索、回放。

图 2.3-247 所示的语音录音接线盒是由一个录音转换盒、2 个呼唤应答盒和相应的连接电缆组成。录音转换盒装在监测装置主机箱附近。呼唤应答盒安装在Ⅰ、Ⅱ端司机室

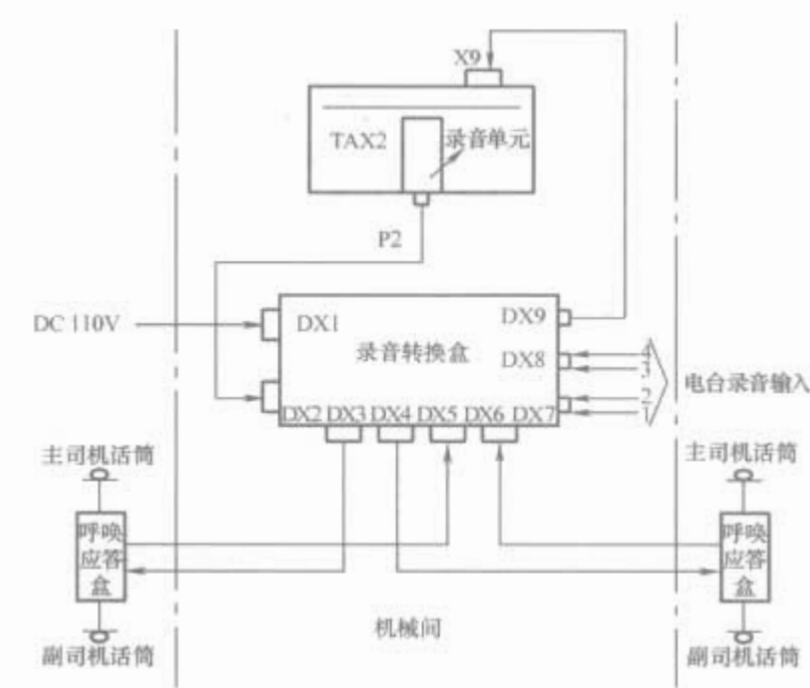


图 2.3-247 带有接线盒的语音装置连线示意图

适当位置。

语音记录装置的功能测试：检测人员在司机室拿起话筒说一句测试用语，然后按压一下呼唤应答盒上的测试按钮；语音录音单元将刚记录的语音信号经录音插件面板上的 P2 插座送出，由 DX2 插座引入录音转换盒，经过接线盒内的功放板放大后驱动呼唤应答盒内的喇叭，回放刚录的测试用语。如果语音清晰无误，说明语音记录装置及其录音通道工作正常，否则语音记录装置或通道有故障。

由于整个设备是用多个功能小盒和功能模块组合而成，而且相互采用接插件方式连接。因此组装十分方便，可按用户需要随意组合和增减，以免造成不必要的浪费。

8.3.5.2 与电台接口参数

语音录音板与电台接口参数见表 2.3-102。

表 2.3-102 语音录音板与电台接口参数	
参 数	指 标
语音信号输入电平范围 (dB)	-26~0
电平值 (mV)	38~774 (120~240 最佳)
平衡输入阻抗 (kΩ)	≥15
不平衡输入阻抗 (kΩ)	≥47
电平控制 (V)	低电平≤0.8 高电平≥4.5

8.4 机车监测数据无线传输装置

监控装置的全面推广及部分机车安全运行辅助检测控制装置的投入运用，使机车信息化获得较大的发展，机车上的计算机技术应用范围不断扩大，与此相应的是机务部门地面网络建设及信息技术应用的不断发展和完善。机车车载系统是机务信息化建设的最基础部分，大量机务基础信息源的获取都是建立在车载应用系统基础之上的。尽管不少既有机车实现了部分运行信息和状态信息的在线动态检测、监控和诊断处理功能，如 JK00430 型走行部监测装置、机车信号记录仪、机车工况记录仪、晃车仪等，但这些设备所记录的信息基本是在机车入库时由工作人员利用手持式转储设备来完成信息转储的。随着各部门均利用机车作为平台，对沿线行车设备进行在线安全监控项目的实施，这种由人员上车完成数据下载的作业，在不同专业部门间同时进行，现场作业管理和协调变得十分困难。

续表

参 数	指 标
车载无线传输主机机箱质量 (kg)	RS232 2 路, 以太网 1 路 约 8
车载主机操作系统	采用 Red Hat Linux

8.4.3 车载设备组成

车载部分由车载无线传输主机、车载通话器、外围接口设备、GSM/GPRS 天线及馈线、WLAN 天线及馈线等组成。车载无线传输主机分别连接监控装置 (LKJ2000 或 LKJ-93)、TAX 箱、调度命令显示终端、机车走行部车载监测装置等。

其中, 无线传输装置通过 CAN 接口与监控装置进行实时信息和记录文件的传输, 连接 TAX2 箱内部的 RS485 总线通信口, 负责接收机车走行部车载监测装置的报警信息和平安信息、微机柜的设备状态信息、DC 600V 供电信息、晃车仪检测的轨道信息等。装置采用 RS485 总线接口与 JK00430 型机车走行部车载监测装置相连, 负责接收全程记录文件; 采用 RS485 总线接口与机车信号记录仪装置相连, 负责接收全程记录文件; 采用 RS422 总线接口与机车工况记录仪装置相连, 负责接收全程记录文件; 采用串行总线接口与调度命令显示终端相连, 实现调度命令的车—地信息交互; 车载主机另外预留 2 个串行通信接口与机车既有电子设备互连; 车载通话器用于司机与地面的话音服务。车载设备组成见图 2.3-248 (注: 虚线部分为既有车载设备, 系统对外实际连线根据机车已有车载设备而定)。

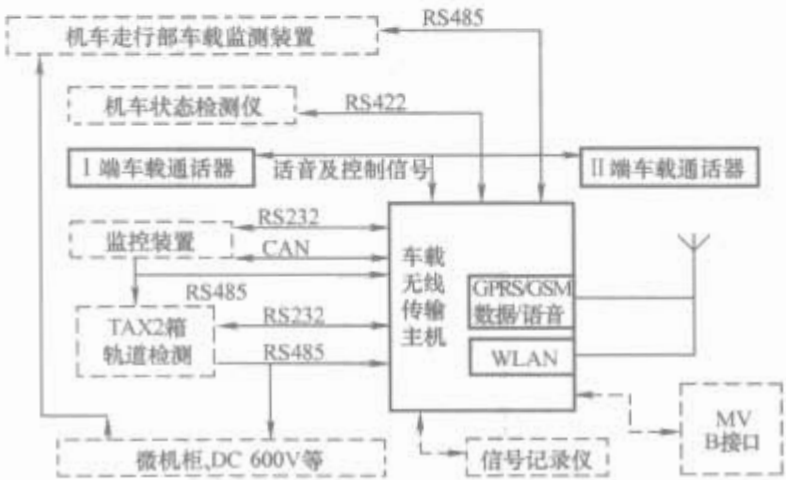


图 2.3-248 车载设备的组成示意图

8.4.4 车载设备原理

车载主机硬件主要由以下 8 大部分组成: 电源板、PC104 CPU 卡、底板、PCMICA 适配器、LED 显示板、无线局域网卡、GSM/GPRS 组件板、天线系统。其工作原理框图见图 2.3-249。

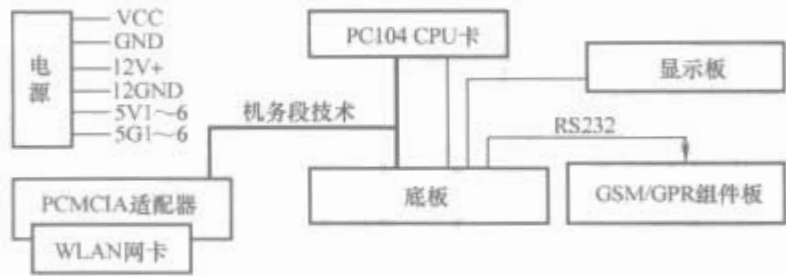


图 2.3-249 车载设备原理框图

PCMICA 适配器将 PC104 总线和 PCMICA 总线相互转换。GPRS 组件板通过 RS232 串行接口与 CPU 主板通信, 实现数据的远程传输。LED 显示板实现信息指示。WLAN 网卡在 CPU 的控制下实现大量数据高速下载。底板集成 PC104 总线和对外的通信控制接口及音频接口。

8.4.5 地面基站

地面基站也叫列车运行状态调度查询系统基站, 分为铁路局数据传输处理基站、局/铁道部数据处理基站、机务段数据传输基站。主要设备包括通信服务器、数据应用服务器、无线转储服务器、交换机等, 其设备连接示意如图 2.3-250 所示。

(1) 通信服务器。通信服务器分为外网通信服务器和内网通信服务器。外网通信服务器 (仅铁路局数据传输处理基站配置) 通过具有固定 IP 地址 ADSL 连接到 Internet, 主要完成机车 GPRS 实时信息的接收与控制、GPRS 方式的监控文件接收、内外网实时信息的传发以及内外网文件传发等功能。在该服务器上需安装 GPRS 实时信息接收软件和机车实时跟踪软件 (设置为外网使用方式), 完成 GPRS 的信息接收和列车 GPRS 控制。外网通信服务器的计算机名命名规则为: WLTS0-局名称汉语拼音的首字母。

内网通信服务器 [路局尚未开通 internet 接入点时, 机务段配置一台 (临时方案); 路局已开通 internet 接入点时, 该服务器不再配置, 服务器上的软件安装到数据应用服务器即可] 完成实时信息以及文件在内网的传发等功能。在该服务器上需安装机车实时跟踪软件 (该软件同时具备实时信息以及文件传发功能)。内网通信服务器的计算机名命名规则为: WLTS1-局、机务段名称汉语拼音的首字母。

(2) 数据应用服务器。该机器连接到铁路 OA 网内 (内网), 主要完成与通信服务器实时信息以及文件的传输, 实时信息的解析与保存, GPRS 监控文件的内外网传输 (局基站), 内网客户端控制命令的上传, 以及分发无线转储服务器上的机车记录文件 (机务段基站) 等功能。同时, 作为网络版地面处理、网络版列车实时查询、网络版实时跟踪电子地图的网络服务器。

在该服务器上需安装机车实时跟踪软件 (设置为内网使用方式)、网络版地面处理软件、网络版列车实时查询软件和网络版实时跟踪电子地图软件。

该服务器的计算机名的命名规则为: WLTS2-局、机务段名称汉语拼音的首字母。

(3) 无线转储服务器。该机器通过无线 AP 连接到机务段的 WLAN 无线网络, 主要完成出入库时机车文件的转储, 无线传输主机配置的维护等功能。

该服务器的计算机名的命名规则为: WLTS-机务段名称汉语拼音的首字母 (全部字母必须大写)。例如, 上海机务段数据应用服务器名为 WLTS-SH。

(4) 调度查询终端。调度查询终端用于对列车运行状态的跟踪查询和机车的出入库状态查询。根据工作站的使用需要可进行:

- 1) 列车跟踪查询控制 (需安装客户端软件)。
- 2) 机车出入库状态及记录文件查询 (需安装客户端软件)。
- 3) 列车运行状态动态查询 (Web 浏览器查询)。
- 4) 列车运行电子地图查询 (Web 浏览器查询)。

列车运行状态调度查询系统基站连接示意如图 2.3-250 所示。

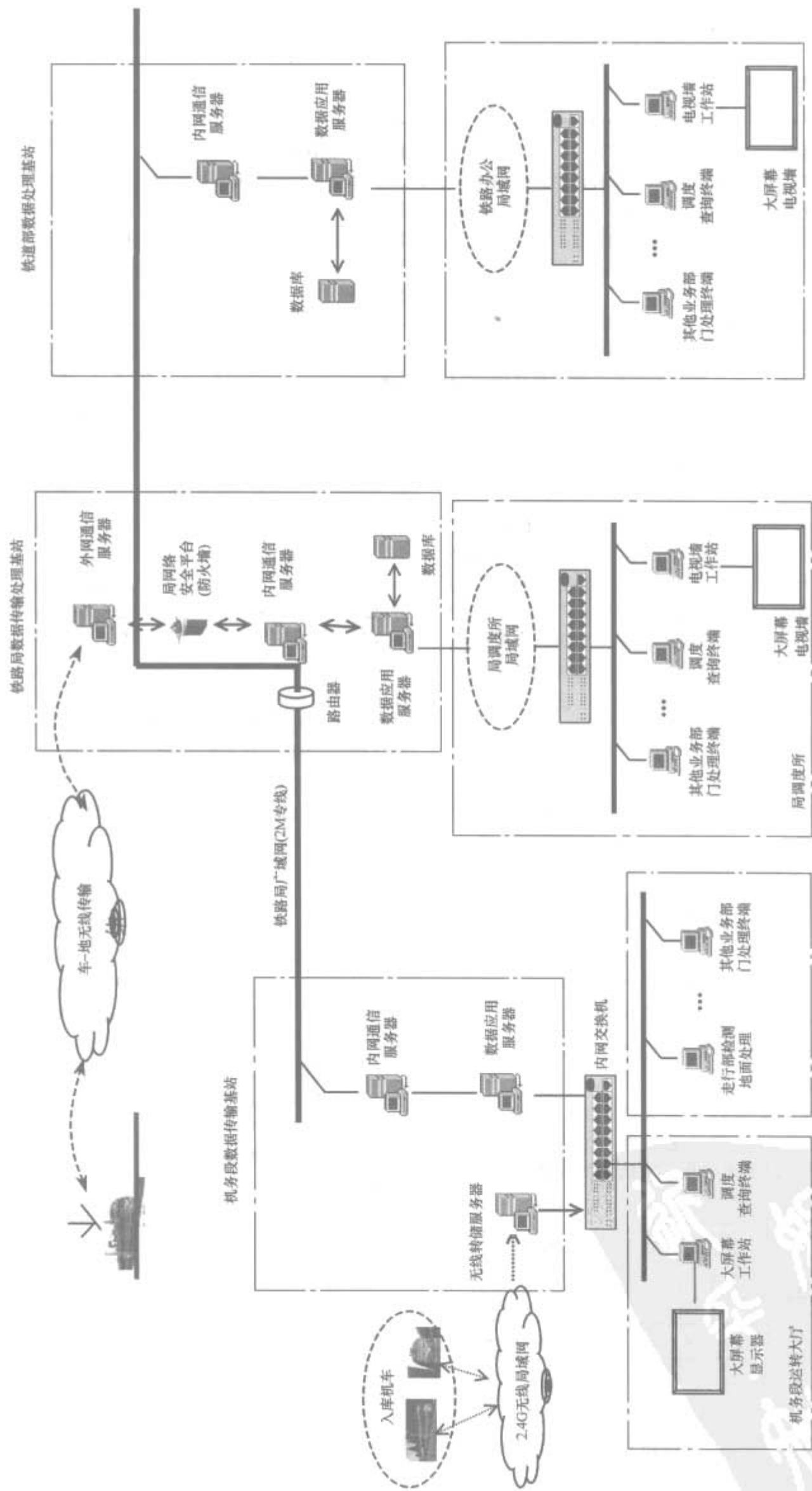


图 2.3-250 列车运行状态查询系统设备连接示意图

8.5 机车状态信息处理装置

8.5.1 内燃机车质量状态监测记录装置

内燃机车质量状态监测记录装置能在列车运行过程中实时检测和记录柴油机、牵引电动机及电器的状态：当参数达到警戒值时，立即报警通知乘务员处理；当发生了主电路接地或控制电路/励磁电路电气故障时，自动显示故障部位。通过与监控装置相连，它得到列车的运行时间、公里标、速度、车次等信息，并将这些司乘信息、柴油机信息和电控等信息在列车运行过程中实时地记录下来。机车回段后，可通过监控装置转储器将所有信息转储到地面微机进行分析处理。本系统在地面微机上有一套完整的机车品质信息系统软件，除能进行单趟车查询外，还能进行年统计、月统计、日统计，并形成相应的统计报表。通过分析参数的渐变过程和

变化趋势，推断将要发生故障的部件，提前进行更换，并能记录电气故障的处理过程，防止或减少事故发生，达到防患于未然的目的，促进了检修工作的信息化。

8.5.1.1 组成原理

以 TAN2 型内燃机车质量状态监测记录装置为例作一介绍。

系统由车载设备和地面设备组成。车载设备包括主机 1 台，附机 1 台，各类传感器及彩色液晶显示器 2 台。箱内共 12 块插件板，插件板尺寸为 4U×160 标准插件。12 块插件板分别为电源板、数字量输入板、采集通信板、模拟输入板（共 3 块可互换）、控制 CPU 板、斩波输出板、主电路接地检测、电气检测 CPU、电气检测接口、备用插件。其系统结构如图 2.3-251 所示，其主机箱内各插件分布情况如图 2.3-252 所示。

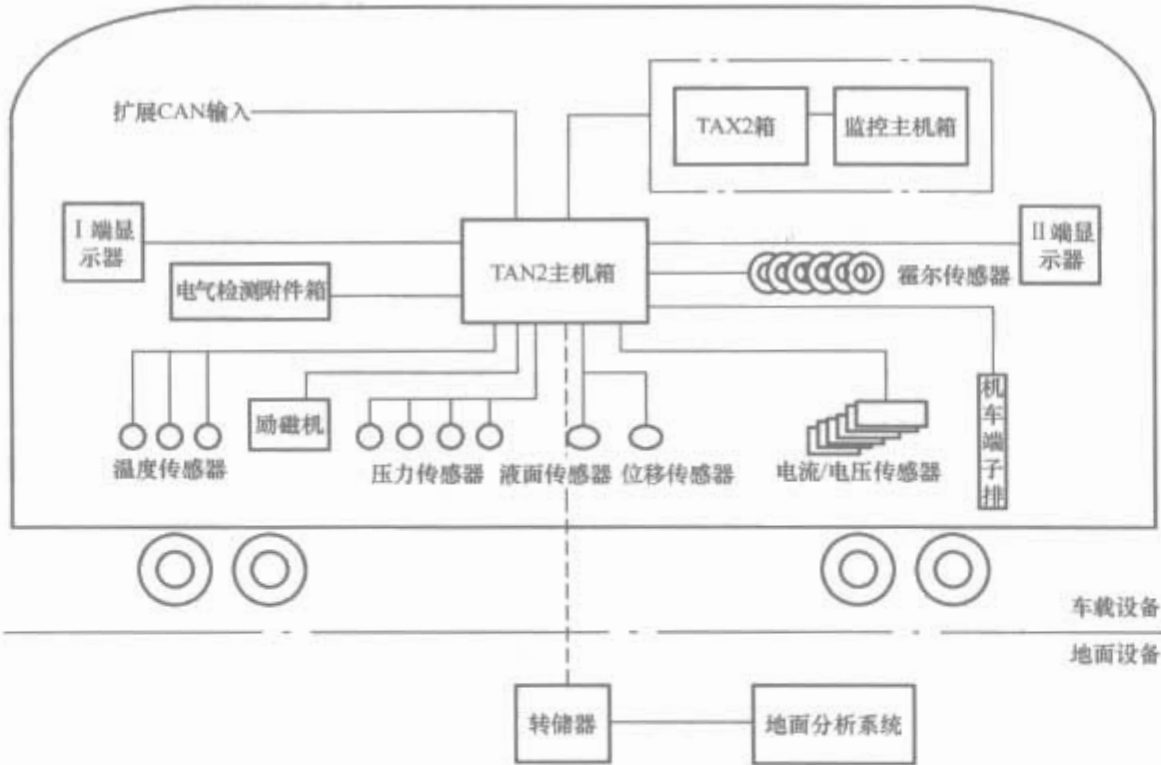


图 2.3-251 TAN2 型内燃机车质量状态监测记录装置系统结构

电源板	数字量输入板	采集通信记录板	模拟量输入板	模拟量输入板	模拟量输入板	备用1(励磁控制)	备用2(励磁驱动)	主电路接地检测单元	电气检测CPU单元	电气检测接口单元	备用3
-----	--------	---------	--------	--------	--------	-----------	-----------	-----------	-----------	----------	-----

图 2.3-252 主机箱内插件分布情况

- 主机箱背后通过航空插头与传感器相连，分别为：
- (1) 电流传感器（共 8 个）。采用 SCM 式传感器，分别反映机车牵引电动机电流、制动电流、主发电机电流。
 - (2) 电压传感器（共 3 个）。采用 SCM 式传感器，分别反映主发电机电压（主整流输出电压）、辅助发电机电压、主发电机励磁电压。
 - (3) 压力传感器（共 2 个）。分别反映前增压器压力和后增压器压力。
 - (4) 温度传感器（共 2 个）。分别反映润滑油出口温度和冷却水温度。
 - (5) 水位传感器（共 1 个）。反映膨胀水箱水位。
 - (6) 供油刻线传感器（共 1 个）。反映柴油机供油刻线位置。
 - (7) 霍尔传感器（共 6 个）。反映主回路各支路接地

- 电流。
- (8) 油压传感器（共 2 个）。分别反映润滑油末端压力和燃油压力。
- 该装置的原理框图如图 2.3-253 所示。

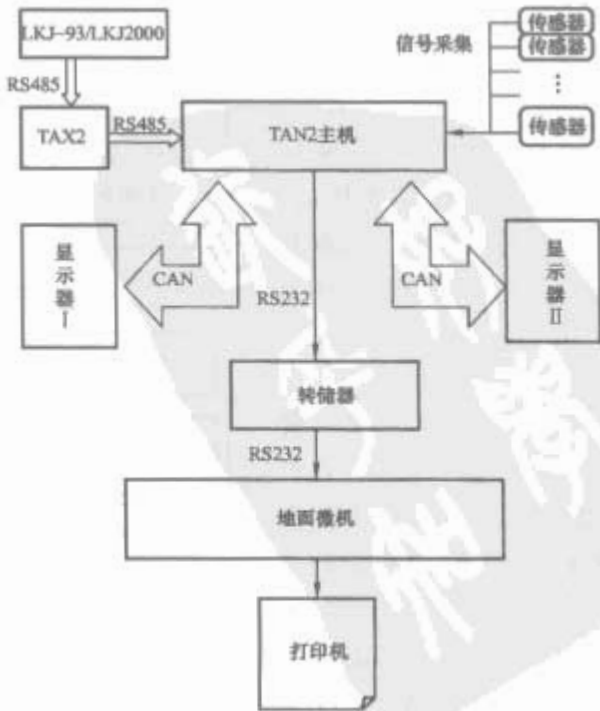


图 2.3-253 TAN2 型内燃机车质量状态监测记录装置系统原理框图

8.5.1.2 功能

- (1) 机车状态检测功能。主要对机车各种质量参数（电流、电压、温度、各类油压、液位及增压压力等）进行采集、记录和分析，并可按技术要求对相应的故障状态进行提示和报警，可以数字或图形方式显示。
- (2) 电气故障检测和处理功能。能对机车控制电路和励磁电路进行检测，并将故障信息以电气图形显示其具体部位及故障处理提示。
- (3) 主电路接地检测功能。可对主电路漏电流进行检测，捕捉主电路接地或瞬间接地故障，准确显示和记录接地故障点的位置和类型，并针对显示的故障处所，提示故障处理和应急处理方法。
- (4) 显示功能。能在显示器上以图形或数字方式实时显示机车状态，并能完成装置的报警和对所记录故障履历的随机查询。
- (5) 励磁控制功能（可选项）。主要负责机车运行的状态驱动，包括磁场削弱驱动、撒沙驱动、电阻制动驱动及空转检测控制。
- (6) 地面分析功能。记录数据可经监控装置转储器转储到地面，经地面分析软件分析处理，可输出全程记录、运行曲线和各种报表，并提供网络查询功能。

8.5.2 电力机车状态检测记录装置

电力机车状态检测记录装置一方面可以起到机车设备状态“黑匣子”功能，另一方面也可以起到将机车的实时状态信息与地面的调度、诊断维护信息进行实时交换的作用，保证机车的质量及运行的安全。

8.5.2.1 组成

电力机车状态检测记录装置和行车安全信息装置共同组成交一直机车的车载机车信息平台。其中，行车安全信息装置主要负责与行车安全相关的信息采集和信息处理，它通过插件型式最多可扩展 7 项与安全相关的专项检测（如弓网检测、走行部检测等）。而电力机车状态检测记录装置主要负责机车运行和控制设备的状态信息及诊断信息的采集和处理，实现列车的故障诊断、故障处理提示和检修支持。它通过串行总线的方式扩展其他机车状态检测和诊断设备（接地诊断装置、智能电度表、辅机保护装置等）。由于它采用总线扩展的方式进行功能扩展，可以自由地扩展列车状态检测和诊断设备。电力机车状态检测记录装置如图 2.3-254 所示。

8.5.2.2 功能

电力机车状态检测记录装置为高性能的嵌入式系统，它具有高速的微处理器，实现数据的采集和诊断分析；具有大容量的不挥发存储器，以便于大量机车信息数据的存储；具有丰富的串行总线接口（以太网、MVB、CAN、RS485/RS422），以便于外围设备的扩展。它的主要性能

参数如下：

- 1) 采用高性能嵌入式 32 位微处理器。
- 2) 采用实时多任务操作系统。
- 3) 具有实时时钟功能。
- 4) 具有大容量不挥发存储器。
- 5) 具有高速 USB 转储接口。
- 6) 具有高速以太网网络接口。
- 7) 具有符合 IEC61375 标准的 MVB 通信接口。
- 8) 具有 CAN 总线通信接口。
- 9) 具有 RS485/RS422 通信接口。
- 10) 可扩展模拟量输入输出和数字量输入输出通道。
- 11) 输入电源：DC 77~137V，功率小于 10W。
- 12) 输出电源：±5V、±15V、±24V。
- 13) 工作温度：（-45~+75）℃。

电力机车状态检测记录装置主要实现以下功能：

- (1) 机车运行参数及故障数据的全面实时采集。采集和监测的既有机车信息内容包括电子控制电路、制动系统、逻辑控制电路、辅助变流器、600V 供电、主辅电路（接地）、TAX 中位置、时间等几乎所有可采集到的车载设备信息，然后对采集的机车数据信息进行识别、分类判断等处理，形成规范的数据代码。
 - (2) 机车运行参数及故障数据的记录存储。电力机车状态检测记录装置对实时采集的机车运行参数和故障数据进行分析处理后，按照事件产生记录的原则，并依照统一规范的文件记录格式对采集的数据信息进行存储，以供地面系统转储。
- 产生记录的事件可以按照用户的要求适当定义，以采集合理数量的采样数据以利于地面重现各类机车运行参数的曲线，从而得出准确的分析结果。事件记录的种类包括如下

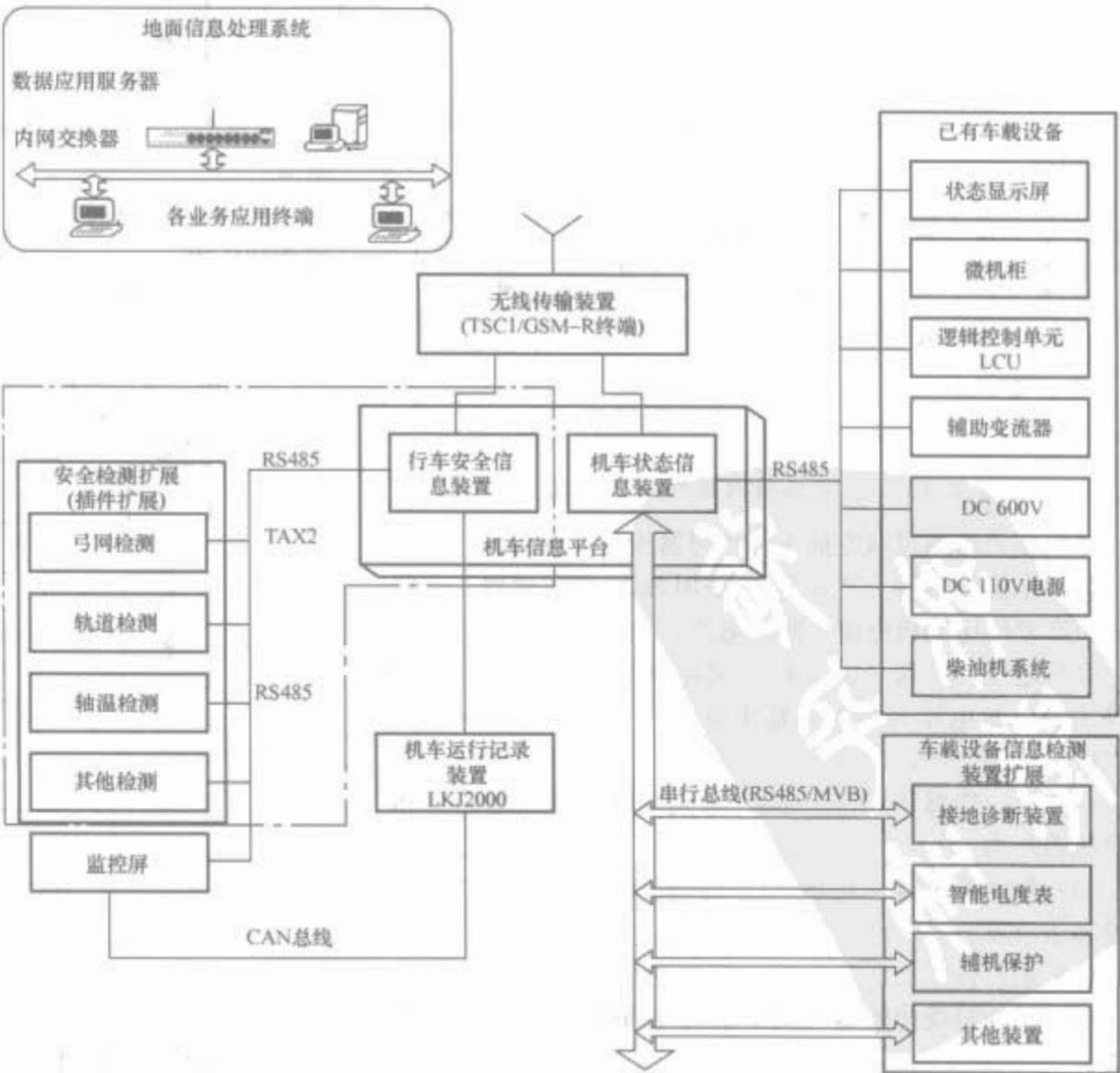


图 2.3-254 交一直电力机车状态检测记录装置结构框图

几种：

- 1) 数字量事件记录。指某数字量发生变化，将该数字量以及相关参数（如日期时间、公里标等）记录下来形成的数据记录。
- 2) 定时事件记录。在规定时间间隔点上发生的事件，该事件发生后把相关的数字量或模拟量记录下来形成的数据记录，如时间变化 1s。
- 3) 模拟量定量事件记录。指当某个模拟量达到阈值点或大于阈值点时产生的事件，该事件发生后把该模拟量和相关参数（如日期时间、公里标等）记录下来形成的数据记录，如速度变化 5km、距离变化 500m 等。模拟量的阈值可设定。
- 4) 故障事件记录。指当某个故障产生后把该故障事件代码和相关参数（如故障发生前后某时间段内相关参数的瞬变数据信息、时间、公里标等）记录下来形成的数据记录。
- 5) 特殊事件记录。特殊事件记录是一些无规律输入的单个数据或多项数据的数据记录，该事件记录的内容可以不受限制，可用于系统的初始化阶段、故障信息产生之时、某一事件发生之时或有地面请求之时。

以上事件记录都可以同时包括多个数字量或模拟量。

(3) 机车运行参数及故障数据的实时传送。装置对于采集的机车运行参数和故障数据按以下两种方式加以实时传送：

- 1) 应司乘人员安全行车的需要将必要的机车动态信息（重要参数、故障信息等）通过 RS485 总线传送给机车显示屏，在相应的人机界面上加以显示。
- 2) 将动态检测到的各类机车信息及初步诊断信息通过串行总线传送给车地数据传输系统，再通过其实时发送至地面机车状态专家分析系统。

(4) 机车故障的实时分析和诊断功能。通过电力机车状态检测记录装置可以将机车所有设备的可提取信息归总，进行全面的处理，对故障的分析、诊断可获得详细、丰富的数据信息。另外，由于本装置采用了高处理速度的 CPU（处理速度高达 300MHz）和嵌入式的实时多任务操作系统，使专家系统等智能处理方法应用到装置的软件当中成为可能，极大地增强了机车在线的故障分析诊断能力；同时，地面通过无线接收到故障数据后也可以通过地面专家系统进行分析处理，并将诊断结果和处理建议在线地回送给车载设备。

对故障的处理分为快速反应层次、综合反应层次、面向地面处理和管理 3 个层次。

- 1) 第一个层次为快速反应层次，与该故障相关的计算机装置应能迅速采取故障隔离措施，起保护和避免故障扩大的作用。
- 2) 第二个层次为综合反应层次，通过列车通信网，各相关计算机装置把列车的所有故障信息与环境参数汇总报告给 CCU，司机从显示屏上得到故障信息和诊断结果，决定如何操纵列车。
- 3) 第三个层次面向管理，诊断计算机应能将有关部件在故障前后一段时间的环境参数记录下来，供维护分析及管理用。

除了以上功能外，本系统可以扩展以下功能：

(1) 接地检测功能。通过机车的主电路和辅助电路中对需要进行接地故障检测的负载或部件加装传感器，经过对传感器采集的漏电流等信号进行滤波和一系列的算法处理之后，根据处理结果本装置可以实时、准确地在线诊断

出机车上该部分电路上出现接地故障的具体部位，从而大大简化了机车离线入库后的检修工作，节约了成本，提高了效率。

装置的接地检测功能同时具有开放性，对于不同的用户要求或者根据车型的不同，都可以通过改变传感器的数量和检测位置进行定制，以实现不同的应用功能。

(2) 电能计量功能。结合从列车监控采集到的司机号、车次号以及公里标等列车运行信息，电力机车状态检测记录装置配备的电能计量插件可以很方便地实现对机车耗电的智能电能计量功能：一方面实现对机车耗电进行分司机、分车次、分区段的智能计量；另一方面，则可对记录的耗电信息进行灵活的处理，既可以实时地发送给显示器显示，也可以将详细的耗电记录存储到电能计量插件的非易失性 RAM 中供地面转储。

电能计量功能同样具有开放性，对于不同的应用要求（例如用户还可能要求对机车 600V 供电等其他耗电量进行计量）可以通过增加插件、更改软件以及更改布线予以满足。

(3) 模拟量和数字量检测等功能。装置配备有数字量输入和模拟量输入两种插件，分别可以检测 16 路数字量和 24 路模拟量，通过该两种插件系统可以根据需要直接检测某些信号。例如，机车上未被检测的牵引变压器油温、储能风缸压力等模拟量参数和 110V 电源柜的控制开关状态等数字量参数信息。以 SS_{7E} 机车为例，该功能可具体检测的信号如下：

- 1) 模拟量——牵引变压器油温、储能风缸压力；
- 2) 数字量——110V 电源柜的控制开关状态，包括司机控制器电源开关、逆变电源开关、受电弓电源开关、充电保护电源开关、主断路器电源开关、控制接地电源开关、辅机控制电源开关、自动信号电源开关、车内照明电源开关、监控装置电源开关、风扇电源开关、无线电台电源开关、标志灯电源开关、电子控制电源开关、前照灯电源开关、电控制动电源开关和空调电源开关。

该功能一样具有开放性，可根据车型的不同和用户要求的不同通过增加插件和更改布线满足不同的应用要求。

8.5.2.3 装置的使用和维护

整个车载故障诊断系统的工作状态信息可以在显示屏上加以显示，同时车载记录信息的转储以及 CPU 插件中的主应用程序的更新也是通过显示屏上的人机交互来加以实现。图 2.3-255 所示为机车运用状态实时检测系统显示界面。



图 2.3-255 机车运用状态实时检测系统显示界面

通过司机室显示屏上的相应显示界面,用户可以获取车载装置的工作状态及采集的数据信息,并且通过按键操作方便地实现记录数据的转储以及应用程序的更新。

9 电气制动装置

电气制动是车辆安全运行的关键技术之一。随着应用要求的提高,出现了多种形式和工作原理不同的电气制动装置,从电空空气制动到利用电机转换成发电机进行电阻制动或再生制动,并伴随技术的进一步开发,出现了涡流制动、磁轨制动等电气制动。

9.1 空气制动机

我国目前应用于电力机车的主型制动机为DK-1型机车电空制动机系列,应用于内燃机车的主型制动机为JZ-7型机车空气制动机系列。

9.1.1 DK-1型电空制动系统

DK-1型机车电空制动机是我国铁路电力机车的主型制动机,也是我国铁路机车中首先采用的电空技术的制动机。它是从1974年开始由我国自行研制,1982年5月通过了技术鉴定。1984年从SS₁型405号电力机车起,国内所有新造电力机车均安装这种制动机,2000年,逻辑功能采用可编程逻辑器件的实现,装备了DKL型逻辑控制单元。

DK-1型机车制动机主要由控制、中继和执行三大部分组成,分别布置在司机室和机械室中。控制部分有电空制动控制器、空气制动阀和控制电路,中继部分有各个电空阀、中继阀及压力开关等部件,执行部分有分配阀、紧急阀和电动放风阀等,如图2.3-256所示。

DK-1型机车电空制动机的综合作用分为自动制动作用、单独制动作用、空气位制动作用及辅助制动作用等。

(1) 自动制动作用。即DK-1型机车电空制动机处于电空位,空气制动阀(俗称小闸)处于运转位,操纵电空制动控制器(俗称大闸)手把在各位置时的综合作用,实现司机操纵全列车的制动、保压与缓解。

(2) 单独制动作用。即DK-1型机车电空制动机处于电空位,大闸处于运转位,操纵小闸手把在各位置时的综合作用,它还包括大闸处于制动后中立位,小闸手把置于缓解位或下压手把时的综合作用。该作用实现单独操纵机车的制动、保压与缓解。

(3) 空气位制动作用。为确保安全运行,空气位作为电空位故障后的一种应急操纵措施。在该位操纵时,不具备电空位操纵时那样齐全的性能,而只保证能控制全列车制动和缓解的基本功能。

(4) 辅助制动作用。由于建立在电控的基础上,又采用积木结构,该项不仅能扩展其自身的功能,也具备为机车其他系统的配合协调提供了接口。

DK-1型机车电空制动机的主要特点:

(1) 主体是机车电空制动机。在正常情况下,由大闸通过其不同的触头组合,相应地控制导线和机车上的各个电空阀控制整个机车制动系统,包括均衡风缸的压强,通过中继阀控制列车管的压强,操纵全列车的制动和缓解。如果车辆也是电空制动机,则车辆的制动作用也可以由这个大闸通过其外接线来电控。

(2) 小闸是一个“空气制动阀”。常规功能(电空位)与机车空气制动机的单独制动阀相同,用于机车的单独制动和单独缓解。但是在电空制动发生故障而失灵时,通过电空

转换手柄的转换(由电空位转为空气位),这个小闸还可以通过控制均衡风缸压强来操纵全列车的常用制动和缓解,即具有大闸的基本功能,作为应急之用。

(3) 采用109型分配阀。在104型空气分配阀的基础上按机车的需要加以改造设计而成的,标准件与通用件多。

(4) 具有动力制动和空气制动自动协调配合的初步功能。动力制动前能给予微量的空气制动,经过一段时间后再将该空气制动缓解。

(5) 模块不具备机电一体化智能功能,不利于故障诊断、报警及记录的实现。

(6) 微机化、网络化功能不强,在现有基础上需改进才能满足超长列车重载运输或高速动车组的要求。

(7) 与国外先进电空制动机相比体积较大。

9.1.2 JZ-7型机车空气制动系统

JZ-7型机车空气制动机是我国铁路内燃机车的主型制动机。早期,在少量新造的国产电力机车上也装过这种制动机。它是在供坦赞铁路内燃机车使用的国产JZ-6型真空空气两用机车制动机的基础上结合新的技术要求加以改进设计而成的。

JZ-7型制动机也主要由控制、中继和执行三大部分组成,分别布置在司机室和机械室中。控制部分有自动制动阀、单独制动阀,中继部分有中继阀、变向阀等部件,执行部分有分配阀、作用阀等,如图2.3-257所示。

JZ-7型机车空气制动机的综合作用分为自动制动作用和单独制动作用。

(1) 自动制动作用。即单独制动阀手柄处于运转位,自动制动阀手柄在各位置的综合作用,该作用实现操纵全列车的制动、保压与缓解。

(2) 单独制动作用。即自动制动阀在运转位,单独制动阀在制动区。

JZ-7制动机的主要特点:

(1) 机车分配阀(F-7型)的主阀采用了三压力结构,而副阀采用二压力结构。它是三压力与二压力混合的制动机,具有良好的阶段缓解性能,但又容易转换为“一次缓解”,即它既能牵引具有阶段缓解性能的车辆,也能牵引具有一次缓解性能的车辆。

(2) 机车制动阀和单独制动阀都能自动保压,无需单设保压位。将制动阀手柄移到常用制动区的某个位置上,就可以获得一定的列车管减压量和机车制动力。制动阀手柄按逆时针方向从左到右移动,列车管减压量和机车制动力可逐步增大。

(3) JZ-7型制动机完全采用橡胶膜板、柱塞阀和O型橡胶密封圈等结构,制造、维护、修理相对比其他自动空气制动机简单和方便,检修期也较长。

(4) JZ-7型制动机是纯空气的自动空气制动机,已不能满足今后国内铁路列车制动的更高要求,JZ-7型空气制动机将被淘汰。

9.2 电气制动

电气制动是通过电磁作用产生反作用力以达到减速制动的目的,在国产机车及动车组上均采用了电气制动。其中,在交一直传动机车上电气制动以电阻制动为主,某些车型上采用了再生制动;在交一直—交传动机车上电气制动以再生制动为主,在某些高速动车组上在再生制动的基础上附加装上涡流制动或磁轨制动。

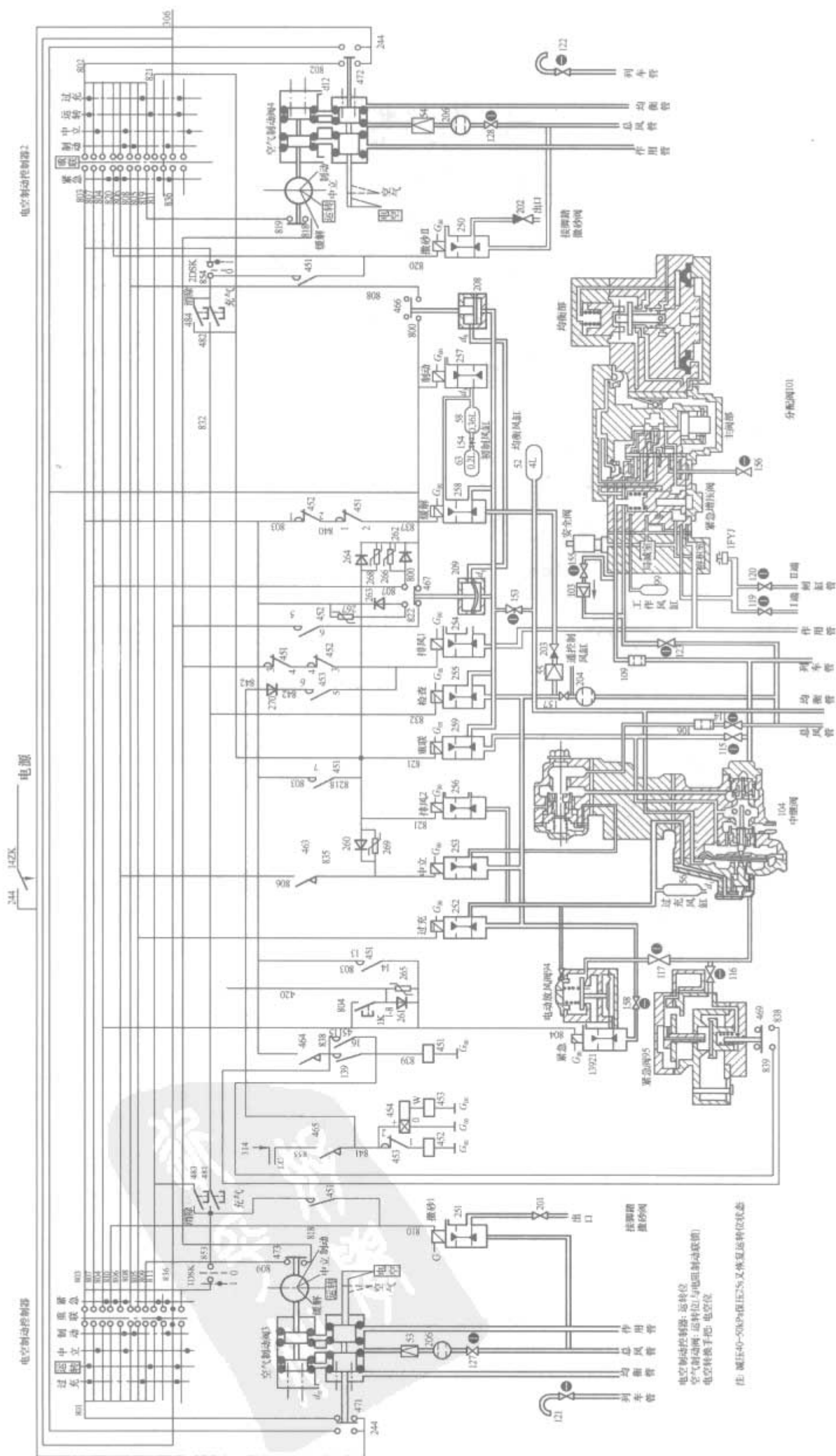


图 2.3-256 DK-1 型机车电空制动机原理示意

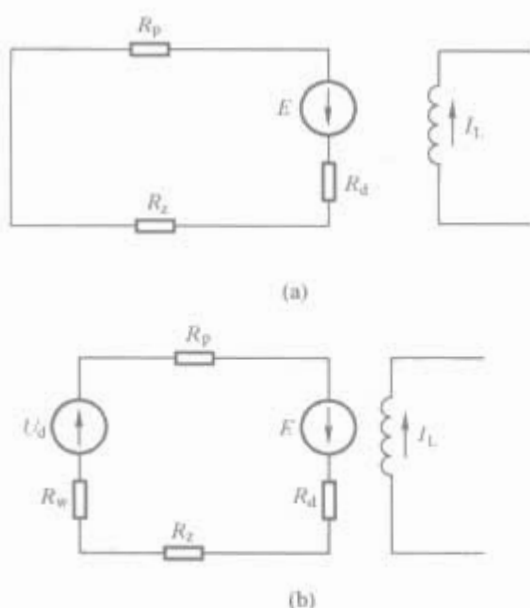


图 2.3-259 加馈电阻制动等效电路

(a) 非加馈电阻制动工况 ($U_d=0$);

(b) 加馈电阻制动工况 ($U_d>0$)

R_d —电机电枢绕组阻抗; R_p —平波电抗器阻抗;

R_z —制动电阻阻抗; R_w —供电绕组阻抗;

I_L —电机励磁绕组励磁电流; E —电机反电势;

U_d —加馈桥的输出电压

由图 2.3-259 可知, 稳态时

$$I_z = (E + U_d) / R_i \quad (2.3-229)$$

式中: E 为电机反电动势, 与速度有关, 制动时 $E=C_e\Phi n$; U_d 为加馈桥的输出电压, 在未进入最大励磁限制时 $U_d=0$; R_i 为电机回路的总电阻。

由式 (2.3-229) 可知, 制动时 I_z 的表达式变为

$$I_z = (C_e\Phi n + U_d) / R_i \quad (2.3-230)$$

在常规电阻制动中, I_z 随机车速度的减小而减小, 因而制动过程中须不断地调节励磁电流 I_L 使之上升以达到磁通 Φ 上升, 进而使 ΦI_z 基本不变, 以维持电机制动力矩 M 基本不变。

当励磁电流达到最大值 I_{Lmax} 时, I_L 不可能再上升, Φ 也即维持最大, 此时, 随着机车速度进一步降低, 则 I_z 也会下降, 制动力矩 M 必定会降低, 导致机车制动力下降。为了克服机车制动力在机车低速区域减小, 可以采用从电网中吸收电能, 通过硅整流器整流桥将该电能补足到 I_z 中去, 即增加 U_d 维持 I_z , 这就是所谓的加馈电阻制动。也就是说, 机车在运行中高速区采用调整励磁来控制制动电流, 而当机车速度降低到励磁达到最大限制值后仍不能保持制动电流的要求时, 开始进入加馈制动以维持低速时的制动力。上述控制由电子控制系统自动完成, 司机只须给定级位, 系统将按级位所对应的速度依据准恒速特性计算出 I_z 的大小进行自动控制。

机车电阻制动时, 根据牵引电机、制动电阻、速度控制及粘着限制的要求, 其特性控制应考虑如下限制工况:

- (1) 最大励磁电流限制。
- (2) 黏着力限制。
- (3) 最大制动电流限制。
- (4) 牵引电机换向限制。
- (5) 机车构造速度限制。

9.2.1.2 再生制动

国产 SS₇ 交—直流传动电力机车采用再生制动, 其典型主电路如图 2.3-260 所示。机车主电路采用一段全控桥 (图 2.3-260 中 VT3、VT4、VT5、VT6) 加一段半控桥 (图 2.3-260 中 VD1、VD2、VT1、VT2) 以满足机车无级相控

调压。其中, 全控桥满足再生制动的需要, 在再生时以逆变器状况把发电机的大部分能源反馈到电网中去。另外, 每半台车还有一段励磁半控桥 (图 2.3-260 中 VD3、VD4、VT7、VT8) 给 3 台串联的他励绕组供电。

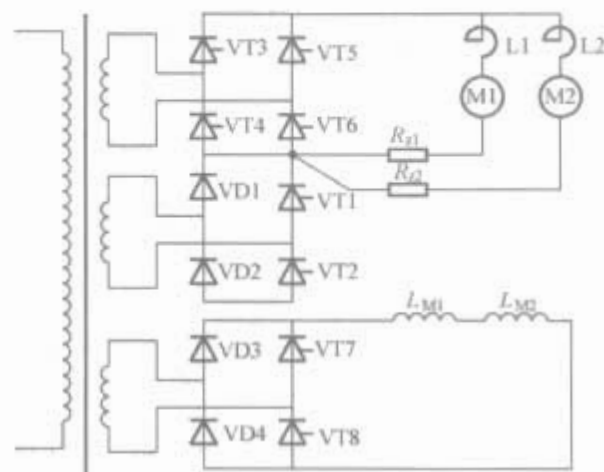


图 2.3-260 交—直流传动电力机车再生制动主电路

在再生制动工况下, 牵引电动机作他励发电机运行, 以便在较大范围调节制动力, 方便地控制列车的运行速度。

制动力的调节方法与交—直流传动电力机车电阻制动制动力的调节方法一样, 其公式也一样, 只不过 U_d 在未进入最大励磁限制时为最大, 并与电机反电动势相反, $U_d = 0.9U_2 \cos\alpha$ (其中 U_2 为二次绕组电压)。

再生制动整个调节过程大致可分为 3 个阶段: 调节励磁电流 I_L 、调节全控桥的端电压 U_d 、加馈制动。

机车在高速区, 为了取得较高的功率因数, 可维持逆变电压 U_d 为最大, 即逆变超前角 β 最小, 且维持常值。这个区域靠改变励磁电流来调节制动电流 I_z , 随着机车速度的下降, 相应增加励磁, 直到额定值为止。

在励磁电流调节到最大允许值时, 如仍需增加制动力, 此时维持励磁不变, 调节控制角 α 改变逆变电压 U_d , 减少 U_d 值。

当速度较低, 调节 $U_d=0$ 仍不能维持制动力时, 改变 U_d 的极性 (从逆变的负值变为正值), 此时全控桥变为相控桥运行, 制动电流 I_z 是由电机反电动势和相控整流电压 U_d 相加共同产生, 此时发电机和电网提供的能量消耗在稳定电阻上, 以保持机车低速时的制动力不变。

交—直—交机车的电气制动以再生制动为主, 只是当再生失效时或电网超压时, 实施电阻制动, 具体请见交—直—交控制及原理。

9.2.2 涡流制动装置

电磁涡流制动装置是利用电磁涡流在磁场下产生劳伦磁力, 而劳伦磁力方向与物体运动方向相反。电磁涡流制动装置具有无摩擦、无噪声、体积小、制动力大的优点。目前机车车辆利用电磁涡流制动的方式主要有盘形涡流制动装置和轨道直线涡流制动装置。

9.2.2.1 盘形涡流制动装置

盘形涡流制动装置利用安装在车轴上的圆盘切割磁力线产生涡流和劳伦磁力。根据产生磁场的机理可分为电磁涡流制动装置和永磁涡流制动装置。

高速电动车组采用的电磁涡流制动装置原理如图 2.3-261 所示。在图 2.3-261 中, I_L 为励磁电流, 使电磁铁心在制动工况下产生所需要的磁场; n 为轮对转速; T_N 为制动力。电磁涡流制动装置安装于电动车组的拖车上, 利用相邻车辆牵引电机的主电路电源作为励磁电源。

永磁涡流盘形制动装置利用永磁铁代替电磁铁线圈产生电磁场, 制动盘在磁场中产生涡流, 阻止磁场增加, 产生制

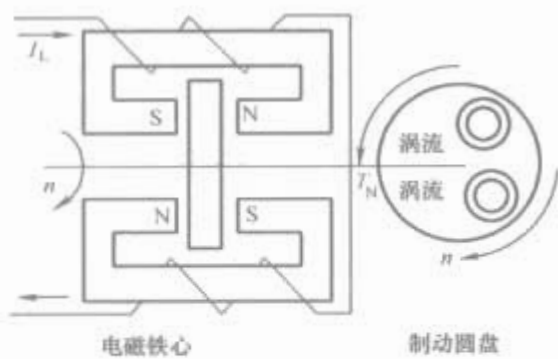


图 2.3-261 电磁场涡流制动原理

动转矩。永磁涡流盘形制动装置原理如图 2.3-262 所示。永磁涡流制动装置的制动盘安装于转轴上，定子为永磁圆盘。永磁圆盘分为内圈圆盘和外圈圆盘，配置有内、外 2 圈磁轭。2 圈磁轭内均交错放置 N 极和 S 极的永久磁铁。机车车辆正常运行时，外圈和内圈的永磁铁极性为异性排列在一起，磁通在极片和磁轭内构成闭合磁路，不穿越制动圆盘，因而不产生制动转矩。机车车辆制动时，内、外圈的永磁铁极性为同性排列，永磁铁通过极片和制动圆盘构成磁路。制动盘随转轴转动，切割磁力线产生涡流和制动转矩，改变极片相对位置可以调节制动转矩的大小。

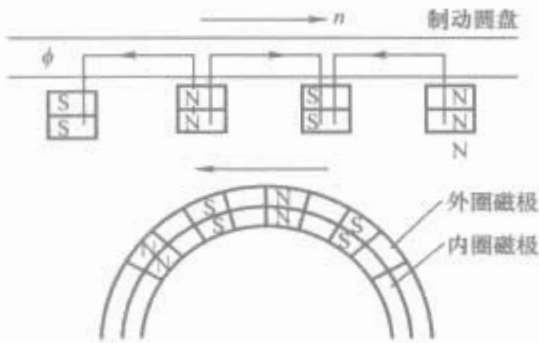


图 2.3-262 永磁涡流盘形制动原理

两种涡流制动装置中，电磁涡流盘型制动的制动功率大，但设备较多；永磁涡流盘型制动结构简单，但由于目前制动功率受到一定限制，尚处于试验阶段。

9.2.2.2 轨道直线涡流制动

轨道直线涡流制动装置通过对安装于转向架两侧车轮之间的条形磁铁励磁，在钢轨上产生涡流使机车车辆制动。它具有无摩擦、制动迅速等优点；同时，轨道直线涡流制动装置可增加机车车辆轴重，提高黏着力，其原理见图 2.3-263。制动状态时，由于电磁铁的 N 极和 S 极相对于钢轨的运动，在钢轨内产生交变的磁场，使钢轨头部产生涡流，涡流与电磁铁相互作用，产生一个垂直于钢轨面的吸引力和一个与机车车辆运行方向相反的制动力；垂直于轨面的力可增加车辆的黏着力，与车辆运行方向相反的力就是电磁涡流制动力。但轨道涡流制动如果要得到很大的涡流制动力，则需要很庞大的制动装置。这种轨道涡流制动装置应用于上海磁浮列车的制动控制系统中。

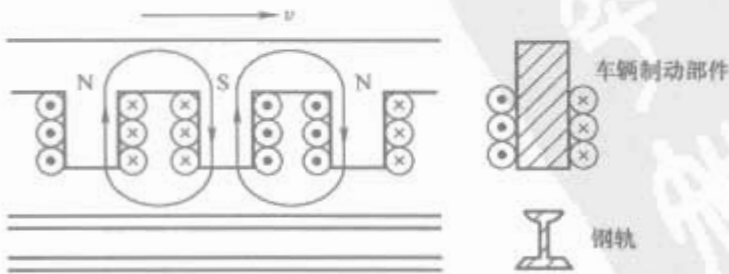


图 2.3-263 轨道直线涡流制动原理

9.2.3 磁轨制动装置

磁轨制动装置亦即电磁轨道制动装置，主要作为一种辅

助的制动方式，用于黏着力不够的高速旅客列车的紧急制动中。

磁轨制动装置主要由励磁电路、构架、制动梁、升降风缸、电磁铁等构成，如图 2.3-264 所示。

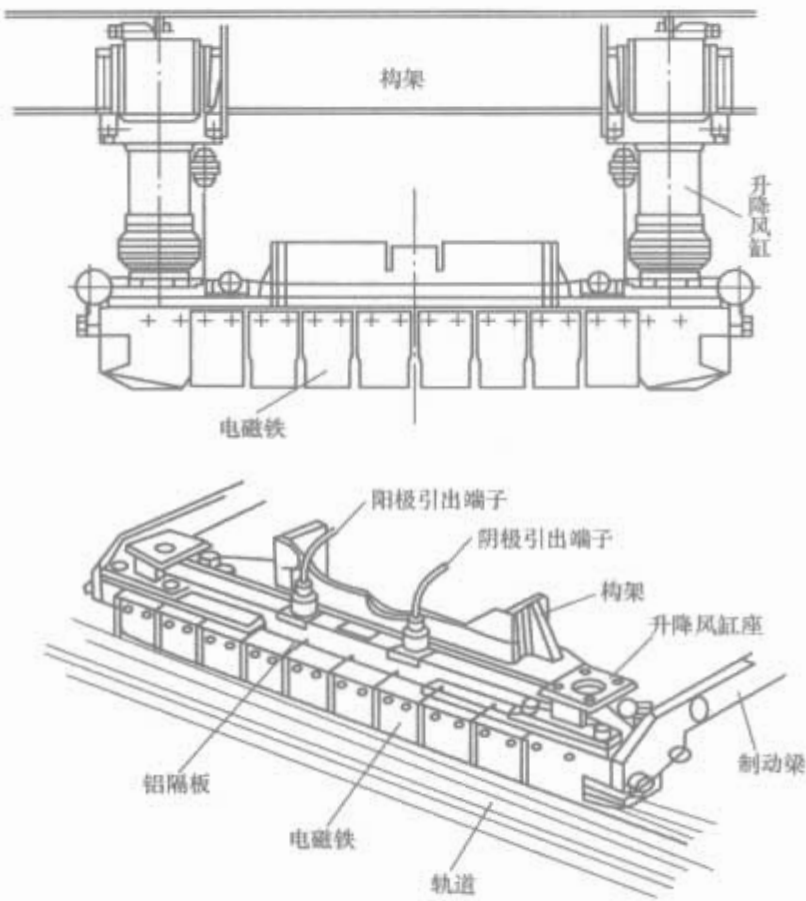


图 2.3-264 磁轨制动装置

励磁电路的正、负极引出端子与提供电能的蓄电池或集中供电电路相连接。构架焊接在转向架上，以传递制动力。制动梁的作用是保证两侧电磁铁与轨道等距离，使其有相同的制动力。升降风缸用于提升或降落电磁铁，非制动时，抬起电磁铁距轨道 120~160mm；制动时，落下电磁铁距轨道 10mm，此时电磁铁通电，电磁铁吸合钢轨，产生摩擦力。

按磁铁悬挂方式，磁轨制动装置可分为高悬挂磁轨制动装置和低悬挂磁轨制动装置。高悬挂磁轨制动装置一般用于高速列车。

按励磁供电方式，磁轨制动装置可分为蓄电池供电、车载集中供电及接触网供电等 3 种方式。蓄电池供电方式安全可靠、电气回路简单，但蓄电池功耗大，制动力小；车载集中供电的电气回路复杂，但制动力大，经济可靠，应用范围较广；接触网供电方式的结构复杂，费用高，电压高，但制动力大。

最近几年推出一种由永久磁铁获得制动力的新型磁轨制动装置。永久磁铁制动过程中不需要励磁，当列车静止时，制动仍有效，可以当作停放制动来使用。

9.3 联合制动装置

现代列车的制动不可能依靠一种制动方式，特别是高速、重载的发展，更需要多种制动方式的联合作用来保证列车的安全运行。

以往国产机车上采用空电联合装置，即空气制动方式与电气制动方式相结合。一种方式是电气制动优先，当电气制动达到最大仍不能达到所需的制动力时，追加空气制动来实现补足，重载货运多应用此种方式；另一种方式是空气制动

与电气制动根据制动模式的要求按一定的比例同时作用，高速动车组多应用此种方式。

当存在两种以上的制动方式时，为了保证各种制动方式相互之间的协调工作，通常设置制动管理控制器，以保证制动平稳及协调控制，特别是在高速动车组中。

动车组联合制动方式特性示意如图 2.3-265 所示。

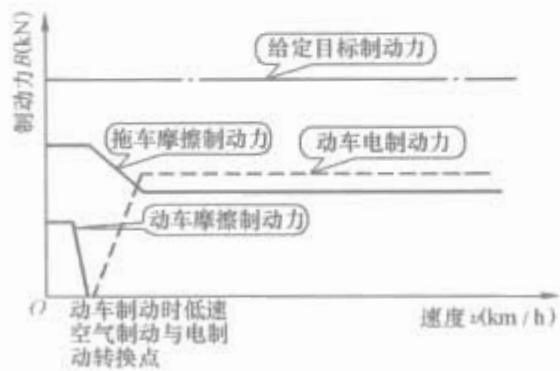


图 2.3-265 动车组联合制动方式特性示意图

在动车组里至少存在轮盘制动与电气制动（电阻制动或再生制动）两种方式。在低速区（一般 30km/h 以下）转换点以上，动轮采用电气制动方式，非动轮采用轮盘摩擦制动，正常情况下总的制动力（列车总的电气制动力与列车总的摩擦制动力之和）等于给定目标制动力。随着列车速度的降低，在低速转换点以下，动轮的电气制动力减少到零（通过联合制动管理系统分配控制，虽然理论上电气制动可以持续到很低的速度甚至接近 0km/h，但在动车组联合制动中一般不建议使用该种做法），之后动轮的轮盘摩擦制动力开始增加至联合制动管理系统分配的目标值，同时联合制动管理系统调整各车的制动力，使之总的制动力之和等于给定目标制动力。

9.4 防滑器及其控制

防滑器主要用于装有盘型制动或其他单元制动机的轨道

制动系统中，主要由速度传感器、控制主机、防滑阀、压力继电器组成，是高速制动系统中的重要组成部分。

防滑器分为机械式防滑器、电子式防滑器和微机控制防滑器等。机械式防滑器是根据车轮角速度的变化，将回转体的惯性转换成位移，以打开阀门或接通控制电路，使角速度骤减的轮对进行缓解。电子式防滑器的控制判据较多，具有较高的灵敏度，还能进行必要的监控和轮径补偿；但其分离电子元件的零点漂移不易清除。微机控制防滑器可以对制动、即将滑行、缓解、再黏着的全过程进行动态检测与控制，数字处理，同时可以利用软件随时提供有关信息。

目前车辆防滑控制器一般多采用微机控制，控制系统根据各轮对的转速、减速度等信息判断轮对的滑行状况，采集制动缸压力值并根据控制策略对相应的防滑阀进行控制，减少滑行轮对的空气制动力以抑制滑行的发生，控制过程中同时进行一些逻辑判断，如列车管的压力等。控制的状态及结果信息通过显示装置进行显示。防滑器原理示意如图 2.3-266 所示。

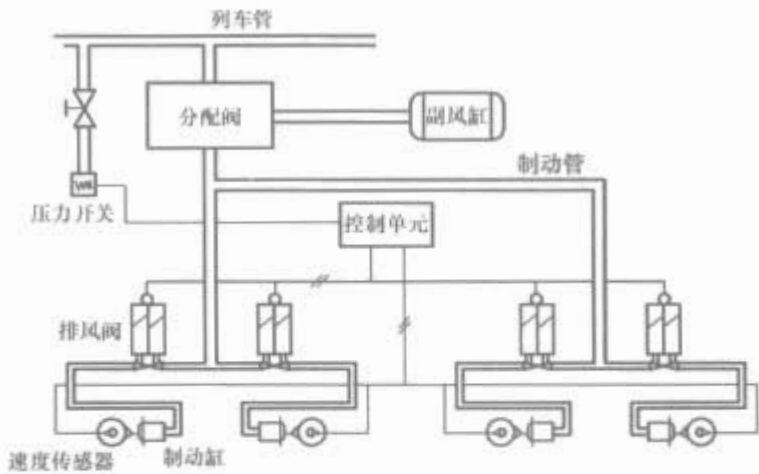


图 2.3-266 防滑器原理示意图

第4章 客车电气设备

1 概述

随着铁路旅客运输产业的发展,旅客对客车车辆的安全性、运输速度和乘坐舒适度等性能要求不断提高,铁路客车电气技术水平的提升和更新速度也相应加快,大量的新技术和新装备不断运用到客车电气系统。我国的客车电气系统的功能从简单的照明、通风发展到具备车厢自动温度调节、列车行车安全监测、列车网络系统等功能的新型系统;客车的供电方式从最初的 DC48V、AC380/220V 到 DC600V 列车供电技术;控制方式从简单的有触点电器控制到微机和网络控制;保护措施从简单的局部的硬件电路保护到智能的系统的监测和保护。客车电气系统在保障旅客运输安全、提高旅客运输品质中起到了非常重要的作用。

1.1 客车电气系统类型

1.1.1 22 (25B) 型客车电气系统

22 (25B) 型客车是我国客车制造发展中的重要产品,电气系统较简单。普通客车采用 DC48V 蓄电池组供电方式,通过车下 5kW 轴头发电装置为蓄电池组充电,同时向车上 DC48V 电气设备供电;母车通过车端电力连接器向子车供电;空调客车还备有 30kW 风冷柴油发电机组(装在车下)和控制屏,为本车空调机组和 AC380V 用电设备提供 AC380V 电源。主要电气设备包括 KFT-I (II) 型 5kW 轴驱发电装置、30kW 风冷柴油发电机组、XPD 配电盘、DC48V 铁路客车用电扇和灯具等。

1.1.2 25G 型客车电气系统

25G 型客车是我国现有铁路空调客车车型中数量最多的主型客车,从 20 世纪 90 年代初开始设计制造。25G 型铁路空调客车电气装置按供电电源电压制式划分,可分为两种:①采用 KD25G 型空调发电车集中输出三相 AC400/230V 50Hz 电源供电的 AC380V 电气系统;②采用电力机车集中输出 DC600V 电源给客车,客车再分散逆变的 DC600V 电气系统。采用 DC600V 电气系统的 25G 型客车从 2003 年下半年开始设计制造,此前设计制造的 25G 型客车均采用 AC380V 电气系统。采用 AC380V 供电的 25G 型客车电气系统,在 2002 年铁道部 25G 型客车统型之前,主要由供电电源控制柜、空调控制柜、应急电源装置(包括车下 DC48V 60Ah 蓄电池组)、照明控制箱、供配电电力线路及车内电器等装置组成。2002 年铁道部 25G 型客车统型后,根据各车种平面布置方案,取消配电室,采用一体化结构设计的 PLC 电气综合控制柜,即将统型前的供电电源控制柜、空调控制柜、应急电源装置(不包括车下 DC48V 60Ah 蓄电池组)和照明控制箱的功能整合、优化设计为一个综合控制柜。

采用 DC600V 供电的 25G 型客车电气系统主要由 DC600V/AC380V 逆变电源、DC600V/DC110V 电源(简称充电机)、车下 DC110V 蓄电池箱、PLC 电气综合控制柜、供配电电力线路及车内电器等装置组成。

25G 型客车车上电气装置,采用 AC380V 供电的客车:

一般照明和插座采用 AC220V 50Hz 电源;轴温报警器、电子防滑器、厕所无人显示器、尾灯、阅读灯、铺号地灯、应急照明和共线电话电源等采用 DC48V 电源;空调机组、电热器、电茶炉和电热温水箱等负载均采用 AC380/220V 50Hz (三相四线制)电源;采用 DC600V 供电的客车:照明灯具、轴温报警器、电子防滑器、厕所无人显示器、呼唤装置和控制电路均采用 DC110V 电源;尾灯、共线电话和播音机 (DC110V/DC48V) 电源采用 DC48V 电源;空调机组、厨房电灶由 DC600V/AC380V 三相逆变电源(三相三线制输出)供电;电热器、电茶炉和电热温水箱(部分车的电茶炉、电热温水箱采用 AC380V)等负载采用 DC600V 电源。

采用 AC380V 供电的 25G 型客车车下电气装置:车下装有布线金属线槽和线管及 DC48V 应急电源装置的 DC48V 60Ah 蓄电池箱;采用 DC600V 供电的客车:车下除装有布线金属线槽和线管外,还装有 DC600V/AC380V 逆变电源箱(包括三相四线制隔离变压器)、DC600/DC110V 电源箱(简称充电机)、DC110V 120Ah 蓄电池箱;在 2002 年铁道部 25G 型客车统型后设计制造的客车均安装有电子防滑器。

25G 型客车车端电气装置在 2002 年铁道部 25G 型客车统型之前,车辆每端各设 4 个 KC-20A 电力连接器、2 个 43 芯集控连接器和 2 个播音连接器;2002 年铁道部 25G 型客车统型后生产的 2003 年第一次铁路客车招标车,43 芯集控连接器改为 15 芯通信连接器;从 2003 年下半年设计制造的 25G 型客车开始,采用 AC380V 供电的客车,车辆每端各设 4 个 KC-20A 电力连接器和 2 个 39 芯控制连接器;采用 DC600V 供电的客车,车辆每端各设 2 个 KC-20D 二极四芯电力连接器、2 个 DC110V 电力连接器、2 个 39 芯控制连接器和一个尾灯插座 (DC48V)。供电电源干线均采用双路双线制。

1.1.3 25T 型客车电气系统

25T 型客车电气系统运用了网络通信、变流、微机控制等新技术,装备了 DC600V 供电系统、列车网络监控 (Lon-Works) 系统、行车安全监测系统、防滑器、烟火报警装置、轴温报警器、电气综合控制柜、塞拉门控制系统、无线收发装置、影视系统等新产品,标志着我国客车电气水平达到了一个新的水平。

1.2 客车电气系统的供电方式

1.2.1 轴驱式发电机供电

主要用于 22 (25B) 型客车和 22 型翻新改造客车。

轴驱式发电机用于普通客车,它悬吊在客车底架,通过皮带轮与车轴联结,并由车轴驱动,同时整流箱和电池箱悬挂于客车底架。控制箱在列车的乘务间内。带有发电装置的车底称之为母车。母车就是带有发电机、整流箱、控制箱和蓄电池的车底。目前我国采用 KFT-I 型和 KFT-II 型发电机,整流箱、控制箱分别是 KP-2A、KP-2B 型的。其工作原理是:车轴通过皮带传动装置带动发电机工作,经过 KP-2A、KP-2B 控制、输出的三相交流电经过整

流板整流成直流电后通过车体配线输入车内，为蓄电池充电并向负载供电。当列车低速运行或停车时，由蓄电池组向车上负载供电。规定列车编组中子车的连续连挂不得超过 2 辆。例如一列编组 18 辆的列车大概有六到八个母车，行李车、软卧和餐车必定是母车。实际运行中通常采用一母带一子的编组方式，子车通过电力连接线从母车获得电能。

22 (25B) 型软卧客车、餐车或宿营车由风冷柴油发电机组为空调装置供电。

1.2.2 空调发电车集中供电

空调发电车集中供电由 KD25G 型空调发电车柴油发电机组集中供电输出 AC400V/230V 三相 50Hz 电源供电，主要用于 25G 和 25K 型旅客列车。

空调发电车作为给空调旅客列车供电的移动电站，其电气系统主要由车上、车下、车端三部分电气装置组成，它与柴油发电机组及其附属系统一起组成发电车的电力系统，向列车的照明、空调和生活等负载供电。

车上电气装置主要由车内交直流照明灯具、轴报仪、火灾报警仪、交直流插座和发电机及其台式控制屏、柴油机冷却和燃油、排气等系统组成。

防滑器、KZS/M-I (II) 型集中轴温监测装置、火灾报警仪、语音门铃、电热温水控制箱等设备安装于组合电器柜内。

车下电气装置主要由不锈钢电线槽、DC24V 启动蓄电池和 DC48V 蓄电池箱、电力主干线和柴油发电机组控制线等组成。

机组到控制屏的电力主干线每相采用 2 (1×120mm²) 或 4 (1×50mm²) DCYJ-750V 辐照交联线，走线排列均匀、紧凑，线槽下部设防进水和排水装置，保证了线槽内不会进水、油等杂质，提高了供电的可靠性和安全性。

车端电气装置设有向旅客列车供电用的 KC-20A 大功率电力连接器、39 芯控制连接器、播音连接器、尾灯插座。

1.2.3 DC600V 供电

DC600V 供电是由机车 (动车组由 DC600V 供电装置提供) 集中输出 DC600V 电源给客车、客车分散变流的 DC600V 电气系统。机车提供 DC600V 电源，采用 2 路供电：一路电源故障时，另一路仍可向客车供电；各车辆主要供电电源安装在车下，不占用客室空间。与空调发电车集中供电方式相比，不连挂发电车可以多连挂一辆客车，增加客运收入；各车独立性强，列车编组灵活；DC110V 全列贯通，各车 DC110V 供电系统互补性强，可靠性高；供电系统可以实现集中控制，操作简单；消除了空调发电车的燃油和噪声污染。

2 25T 客车电气系统

25T 型车是 2004 年 4 月 18 日第 5 次铁路提速时推出的运行时速 160km、构造速度 176km 的新型客车。该型车采用了机车供电技术，实现机车向客车供电，电气化区段运行的客车采用 DC600V 供电技术；采用信息技术，整列车构成 PLC 控制的无主网络监控系统、行车安全监测诊断和无线传输系统，实现了列车监控、诊断信息向地面设备的传输。供电方式有以下几种：

- (1) AC380V 供电客车 (BSP 公司生产的 25T 客车)。
- (2) AC380V 兼容 DC600V 供电客车。
- (3) DC600V 直供客车 (即采用机车集中整流、客车分散变流模式，目前 25T 客车大部分都是采用该供电模式)。

下面以 25T 硬卧车为例介绍。

2.1 25T 客车电气系统组成

25T 客车电气系统组成框图如图 2.4-1 所示。



图 2.4-1 25T 客车电气系统组成框图

注 39 芯连接器中包括：①行车安全监测网线；②电气监控网线；③供电请求、供电允许及其 110V 电源线、塞拉门集中控制、播音 (轴报)、烟火报警、旅客信息系统网线、影视系统传输介质等。

2.2 主要设备及功能

2.2.1 按供电方式分

按供电方式不同划分，设备可分为直流设备和交流设备。

2.2.1.1 直流设备

DC600V 供电设备有三相逆变器、充电机，电气设备有电开水炉、温水箱、客室电热取暖器 (DC600V 直供客车)。

DC110V 用电设备有照明灯、轴温报警装置、防滑器、塞拉门、内端门、空调控制、电开水炉控制、温水箱控制、影视系统放大器、软卧车内液晶电视 (2004 年生产的为单相逆变器供电)、行车安全监测装置、集便器控制电源、烟火报警器等。

48V 供电设备有共线电话、尾灯。

2.2.1.2 交流设备

AC380V 用电设备有电开水炉、温水箱、客室电热取暖器 (兼容供电客车)、集便器加热。

AC220V 用电设备有电伴热、通风机、电源插座、影视控制柜、餐车电视机。

2.2.2 按安装位置分

按安装位置不同，可分为车上和车底设备两类。

2.2.2.1 车上设备

车上设备有电气综合控制柜、照明监控柜、集便电源柜、播音监控柜、影视控制柜、中央监控柜、监控显示柜。

(1) 照明监控柜安装在普通软卧车乘务员室内，柜内安装视频系统放大器和分支器、轴温报警器声光报警指示、车厢级行车安全监测主机、烟火报警主机等，并对全车照明进行控制。照明监控柜上的音量调节器可调节乘务员室内的扬声器音量大小。

(2) 集便电源柜安装在乘务员室内，内装集便器电源模块，盘面上设集便器指示灯，一位集便器指一位端集便器，二位集便器指二位端集便器。

(3) 播音监控柜安装在播音室内，柜内设播音电源、天

线负载盒、塞拉门集控电源及指示器、旅客信息显示系统主控站、轴温报警记录仪、车厢级行车安全监测主机、轴温报警器声光报警指示器、烟火报警主机等，并对全车照明进行控制。

(4) 影视控制柜安装在播音室内，负责为整列车提供影视信号。

(5) 中央监控柜安装在车辆工程师室内，柜内设触摸屏、车厢级行车安全监测主机、列车级行车安全监测主机及无线传输装置。

(6) 监控显示柜安装在带车辆工程师室软卧车车辆工程师室内，柜内设行车安全监测触摸屏和电气监控触摸屏。

2.2.2.2 车底设备

车底设备主要设有输电干线电缆、金属电线槽、逆变器箱、8kW+3.5kVA 充电机箱、DC110V 蓄电池箱、防滑系统、轴温报警系统、行车安全监测装置及其他电气装置。

DC600V I、II 路干线通过车端 KC20D 电力连接器全列贯穿；一、二位侧的 DC110V 输电干线通过车端 SL21X 型电力连接器全列贯穿。

8kW 充电机为列车 DC110V 蓄电池提供浮充电源，同时为车上需要 110V 直流电源的直流负载提供电源。3.5kVA 单相逆变器为车内影视控制柜、交流电源插座供电。逆变器箱内装设 2×35kVA 三相逆变器和 15kVA（部分车为 10kVA 或 12kVA）隔离变压器。2×35kVA 三相逆变器同时工作，互为热备份，为车内空调压缩机、通风机、冷凝风机、空气预热器等提供工频三相 AC380V 电源。隔离变压器为车内空调度排风机、管路伴热、集便器伴热提供单相 AC220V 电源。逆变器起动方式为 VVVF 软起动，输出为 CVCF 三相交流 380V、50Hz。

DC110V 蓄电池箱箱体为不锈钢，内置 78 节（部分车为 80 节）DC110V GNZ120-（4）C5 = 120Ah 碱性中倍率蓄电池，通过电缆与充电机箱相连。

防滑系统的速度传感器（每轴 1 个）、排风阀（每轴 1 个）设在车底相应位置，通过检测控制电缆与车上铁路客车电气综合控制柜内防滑器主机相接，从而对车辆的运行与制动状态进行控制。

轴温报警系统不间断监测并显示转向架各轴温度，当某轴位温度异常时进行声光报警，同时全列所有轴温报警器同

时显示车厢顺位号、轴位号和温度，有多个轴位同时超温报警时循环显示所有报警点轴温。轴温报警仪主机安装于电气综合控制柜盘面，全列轴温数据记录仪安装于车辆工程师车中央监控柜内。

2.3 客车 DC600V 供电系统

2.3.1 工作原理

DC600V 供电的旅客列车在电气化区段运行时，采用电力机车集中供电（DC600V）、客车分散交流供电方式。在非电气化区段运行时，大功率内燃机车本身带有辅助发电机，可将辅助发电机组输出整流成 DC600V 后向客车供电，也可采用 AC380V 柴油发电机组集中供电。DC600V 供电系统工作原理见图 2.4-2。

2.3.1.1 电气化区段系统运行方式

在电气化区段，客运（SS₈、SS₇、SS₉）电力机车的列车辅助供电装置将受电弓接受的 25kV 单相高压交流电降压、整流、滤波成 600V 直流电。机车上安装了 2 套 DC600V 电源装置，两套装置分两路通过 KC20D 连接器向空调客车供电。空调客车通过电气综合控制柜自动（按车厢号分奇偶选择）或手动将其中一路 DC600V 电源送入空调逆变电源装置（简称逆变器）及 DC110V 电源装置（简称充电机）。逆变器将 DC600V 电源逆变成三相 50Hz 交流电，向空调装置（25G 型 DC600V 的电开水炉也采用 AC380V 电源）等三相交流用电负载供电；充电机将 DC600V 电源转换成 DC110V 电源，给蓄电池组充电的同时向照明、供电控制等负载供电。客室电热器直接采用 DC600V 电源。

25T 型客车的空调机组之所以采用 2×35kW 逆变器供电，主要出于两方面考虑：①25T 型客车由于新增加了许多设备，单车负载容量较大；②适应新的运行方式，增加供电系统的可靠性和安全性。2 台逆变器中一台主要给空调机组供电；另一台给电开水炉、伴热器等交流负载供电。正常情况下，2 台逆变器相互独立，互为热备份。但当其中一台发生故障时，由另一台负责继续向负载供电，只是部分受控负载要减载运行（如空调机组转入半冷或半热工况）。客室电热器、温热水器等电阻性负载，采用 DC600V 直接供电的方式，一方面减轻逆变器的冬季负载，另一方面减小电阻性负载引起的漏电流。

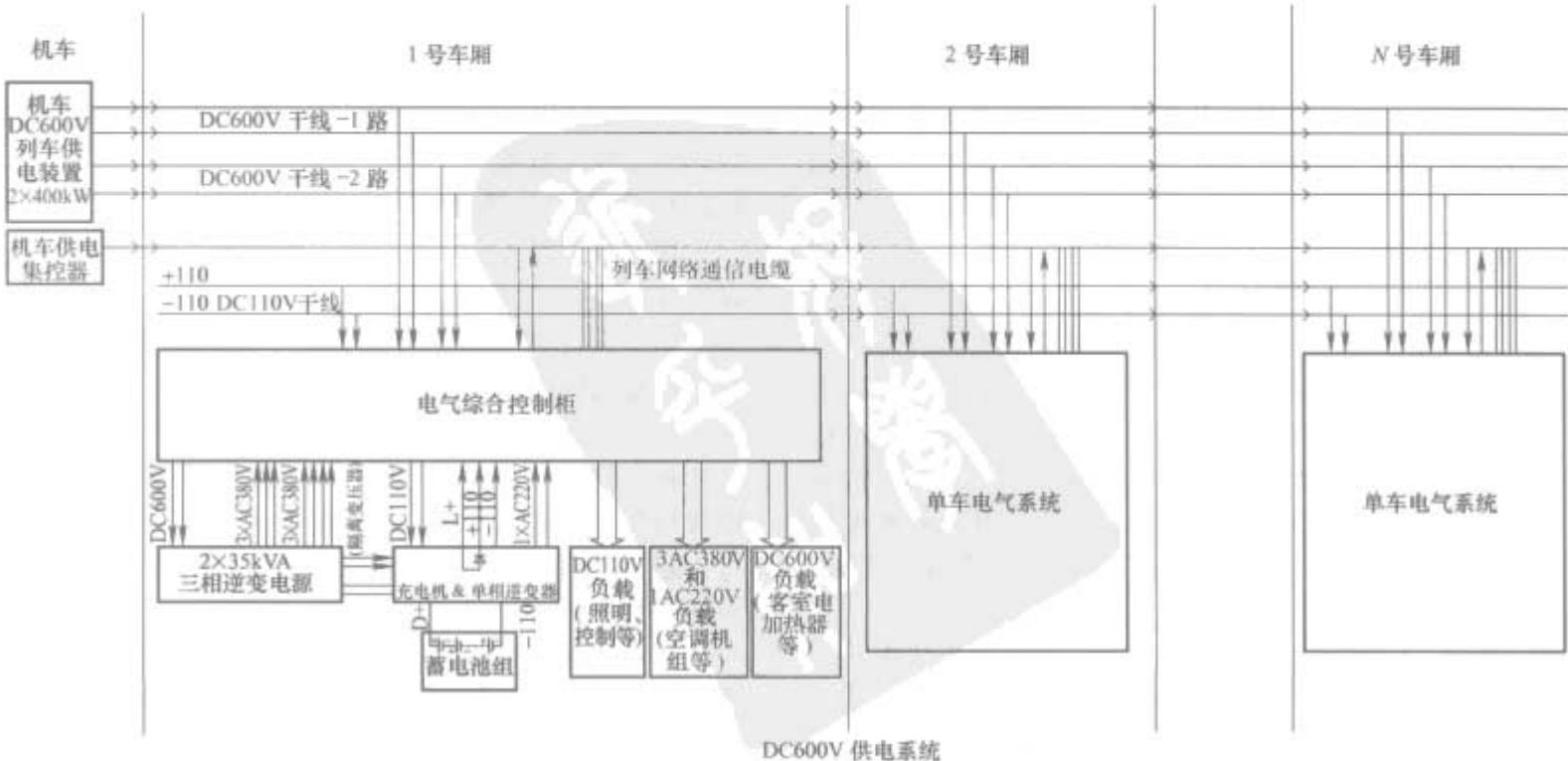


图 2.4-2 DC600V 供电系统原理框图

由于电气化区段每隔 25km 左右便有一个分相区（不同变压器之间换相），即无电区，此时机车没有输入输出电源，因此逆变器在过分相区时也就没有 DC600V 输入、三相交流输出电源。为了避免频繁断电，照明负载采用 DC110V 供电；在牵引区段，由充电机向照明负载供电，而过无电区时则由安装在车下的蓄电池组供电。同样，为了保证对控制回路的不间断供电，控制电路也采用 DC110V 供电（应急供电）。

为了防止本车蓄电池放亏或故障，保证重要负载（如轴温报警器等）的不间断供电，全列蓄电池通过阻断二极管并联。尾灯、电话等设备从延续性的角度考虑仍采用 DC48V 供电。

2.3.1.2 非电气化区段系统运行方式

非电气化区段，内燃机车牵引的 DC600V/AC380V 兼容空调客车，既可采用大功率柴油发电机组直接供电，也可采用将发电机组交流输出整流成 DC600V 供电。如果发电机组的输出为 2 路三相 380V、50Hz 交流电，空调客车通过电气综合控制柜自动选择其中一路的三相交流电直接向空调装置、电开水炉等三相用电负载供电；通过 DC110V 电源装置将三相 AC380V 变换成 DC110V 直流电，给蓄电池组充电的同时向照明、供电控制等负载供电。如果发电机组以整流方式输出 2 路 DC600V 直流电，空调客车通过电气综合控制柜自动选择其中一路 DC600V 直流电送入逆变器及充电机。逆变器将 DC600V 直流电逆变成三相 50Hz 交流电，向三相用电负载供电；充电机将 DC600V 直流电变换成 110V 直流电，给蓄电池充电的同时向 110V 直流用电负载供电。

2.3.1.3 25T 型 DC600V/AC380V 兼容供电客车

目前主要是 AC380V 集中供电的同时兼顾了 DC600V 供电系统，即兼容供电系统不仅可以运用在柴油发电机组 AC380V 集中供电系统，在电气化区段也可以直接用 DC600V 供电系统。

尽管可以由柴油发电机组集中供电，但由于要兼顾 DC600V 供电，DC600V/AC380V 兼容供电的 25T 型客车的照明和控制系统采用 DC110V 供电，车下安装中倍率碱性蓄电池和 DC600V/AC380V—DC110V 充电机；而空调机组、客室电加热、开水炉、温水器伴热等主电路全部采用 AC380V 供电，控制回路则采用 DC110V 控制。

2.3.1.4 DC600 供电系统的供、配电

25T 型客车供电系统为 DC600V 2 路干线独立供电、分散变流。供、配电的控制由车内电气综合控制柜来完成，其控制系统采用 PLC（可编程控制器）。

I、II 路 DC600V 电源干线分别经车底金属线槽、分线箱引至车内电气综合控制柜，根据需要经手动或 PLC 自动选择其中一路电源至车底逆变器箱。逆变器箱内设 2 台 35kVA 逆变器（DC600V/3AC380V、50Hz）和一台 15kVA（10kVA 或 12kVA）隔离变压器（输出三相四线制 AC380V/AC220V），2 台逆变器互为热备份。逆变器箱输出的 2 路三相三线制 AC380V、50Hz 电源和一路三相四线制 AC380V/AC220V、50Hz 电源经电气综合控制柜后控制车内各交流用电设备。

编组时原则上 I 路、II 路负载应均衡，例如 1、3、5…车由 I 路供电，2、4、6…车由 II 路供电。主要控制电源为 DC110V。I、II 路 DC110V 干线电源在车底分线箱汇接后经走线金属线槽引至车厢内电气综合控制柜，经分配后供给本车各直流用电设备。车下设一台充电机箱、DC110V、

120Ah 镉镍碱性蓄电池箱。充电机箱内设 DC600V/DC110V、8 kW 充电机和容量不小于 3.5kVA 的单相不间断隔离逆变器。充电机输出 DC110V 电源，为车底蓄电池充电，同时为 DC110V 负载供电。蓄电池箱正、负输出线设熔断器，箱体采用不锈钢材质并接地。

2.3.2 客车 DC600V 供电系统主要技术性能和参数

2.3.2.1 系统组成

客车 DC600V 供电系统采用集中整流、分散变流方式。系统主要由 DC600V 供电电源装置、三相逆变电源、隔离变压器、DC600V/DC110V 电源装置、客车电气控制柜、蓄电池组等设备组成。

对于电力和内燃机车牵引供电的旅客列车，DC600V 供电采用 2 路独立供电方式，动车组根据供电容量及动车供电装置型式作具体规定。

对于 DC110V 电源，机、客车互相独立，客车应全列贯通，各车蓄电池及充电机通过隔离二极管与 DC110V 干线并联。动车组可按单元组合方式具体确定。

客车 DC600V 供电系统应设置 2 级接地保护电路。机（动）车设置客车供电电源装置及客车 DC600V 供电干线接地保护电路，推荐采用中点接地保护电路。中点接地保护等效电路原理见图 2.4-3，其中图 2.4-3（a）适用于电力机车、电动车组供电，图 2.4-3（b）适用于内燃动车组供电。图中 R 的选取以 DC600V 对地绝缘为零时的接地电流不大于 300mA 为限。图中 TA 为电流传感器或类似装置。客（拖）车每节车辆设本车在线绝缘检测装置。本车连线绝缘电阻低于设定值（0.1~0.6MΩ 可调）时，切除本车 DC600V 供电电源。

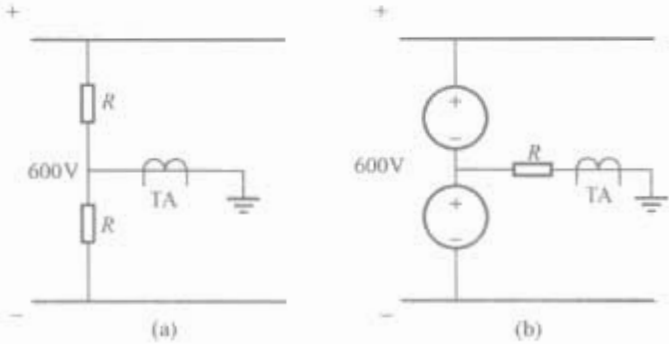


图 2.4-3 中点接地保护等效电路原理图

(a) 用于电力机车、电动车组供电；(b) 用于内燃动车组供电

客（拖）车内未隔离的且由逆变器供电的交流负载中性线不接地，所有设备的金属外壳设接地线。

2.3.2.2 系统主要技术参数

(1) 绝缘性能。DC600V、DC110V、AC380V 干线间及其分别对地间的绝缘电阻值应符合表 2.4-1 要求。

表 2.4-1 绝 缘 电 阻		MΩ		
额定电压 (V)	绝缘电阻表 等级 (V)	相对湿度 (%)		
		<60	60~85	>85
DC600, AC380	1000	运用列车≥2	0.38~2	≥0.38
DC110V	500	新造单车≥10	2~10	≥2

(2) 介质强度。DC110V 干线，施加工频 1000V 历时 1min，无击穿或闪络现象；AC380V 干线、DC600V 干线，施加工频 2500V 历时 1min，无击穿或闪络现象。

(3) 供电容量。电力机车为 2×400kW；内燃机车、动车组由用户与制造商协商确定。

(4) 干线电压。对于 DC600V 输电干线，额定电压 DC600V，电压允许波动范围 DC500V~DC660V，相对峰—峰纹波因数小于 15%，瞬态过电压 720V 允许持续不大于 2s，1200V 允许持续不大于 200μs；对于 DC110V 输电干线，额定电压 DC110V，电压允许波动范围 DC77~DC125V，相对峰—峰纹波因数小于 15%。在最大编组满载工况下，首尾客（拖）车间 DC600V 输电干线的电压降应小于额定电压的 3%。

(5) 供电安全。司机室应设置具有机械、电气联锁功能的供电操作钥匙，用于投切列车供电电源，机械上保证仅在停止供电位方能取出钥匙，其管理上等同供电牌。供电控制电路应有供电安全联锁功能。

2 路供电装置应分别设有接地保护电路，交直流侧过载、过电流、过电压保护电路和短路直接保护，输出电压、输出电流显示装置及用电计量装置。交流侧停止供电后，1min 内输出电压应降至 36V 以下。

(6) DC110V 负载分级及欠电压保护。为防止蓄电池过放电，DC110V 用电负载应按列车安全运行要求分级控制。控制电路、防滑器、轴温报警器、应急照明等不允许中断供电的负载由 DC110V 干线供电，客车紧急通风、正常照明等负载由本车 DC110V 供电装置供电。DC110V 供电回路应设置欠压保护电路。

(7) 电磁兼容性。系统内各主要部件的电磁兼容性应符合 TB/T 3034—2002《机车车辆电气设备电磁兼容性试验及其限值》的规定。

3 主要电气设备

3.1 三相逆变电源

3.1.1 主要作用

三相逆变电源是列车 DC600V 供电系统的重要组成部分。它的主要作用是将供电母线送来的 DC600V 直流电逆变

为正弦波形的三相 380V 交流电，并控制输出电压的幅值和频率，供车上的各种电器使用。三相逆变电源的负载包括通风、空调、厨房设备及客车饮水系统，夏季负载为压缩机、通风机、冷凝风机、废排风机和开水炉等；隔离变压器（三相四线制输出）主要为单相 220V 负载（如伴热等）及电灶设备等供电。

3.1.2 系统组成

我国的客车三相逆变电源有 TGF20 系列客车电源和 TGF23 系列客车电源两种，其电路如图 2.4-4 和图 2.4-5 所示。

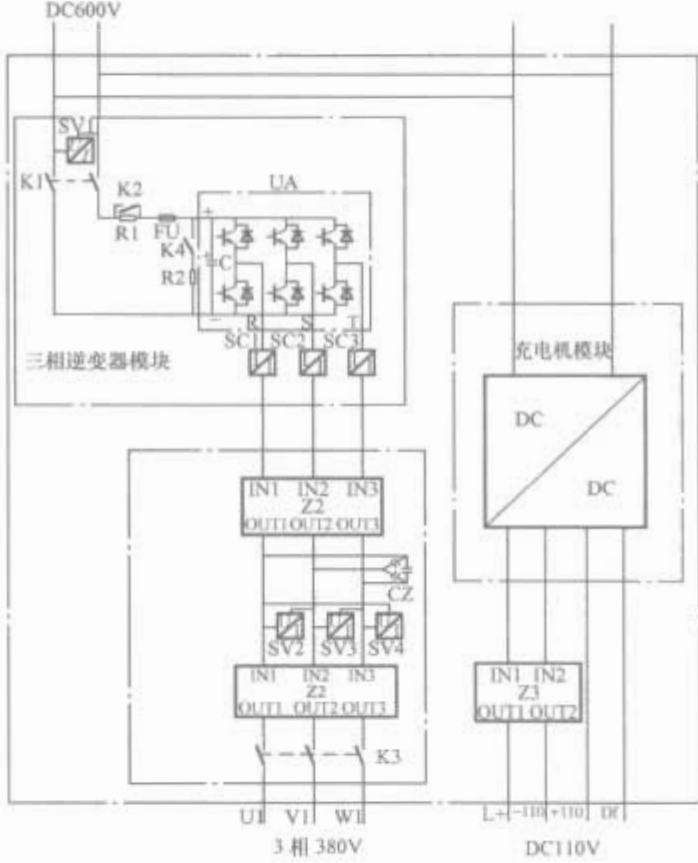


图 2.4-4 TGF20 系列客车电源电路图

TGF20 系列客车电源变换箱应用于 25G 型客车上，分为软硬卧车、行李车两种结构，其中主要是部件布置位置不

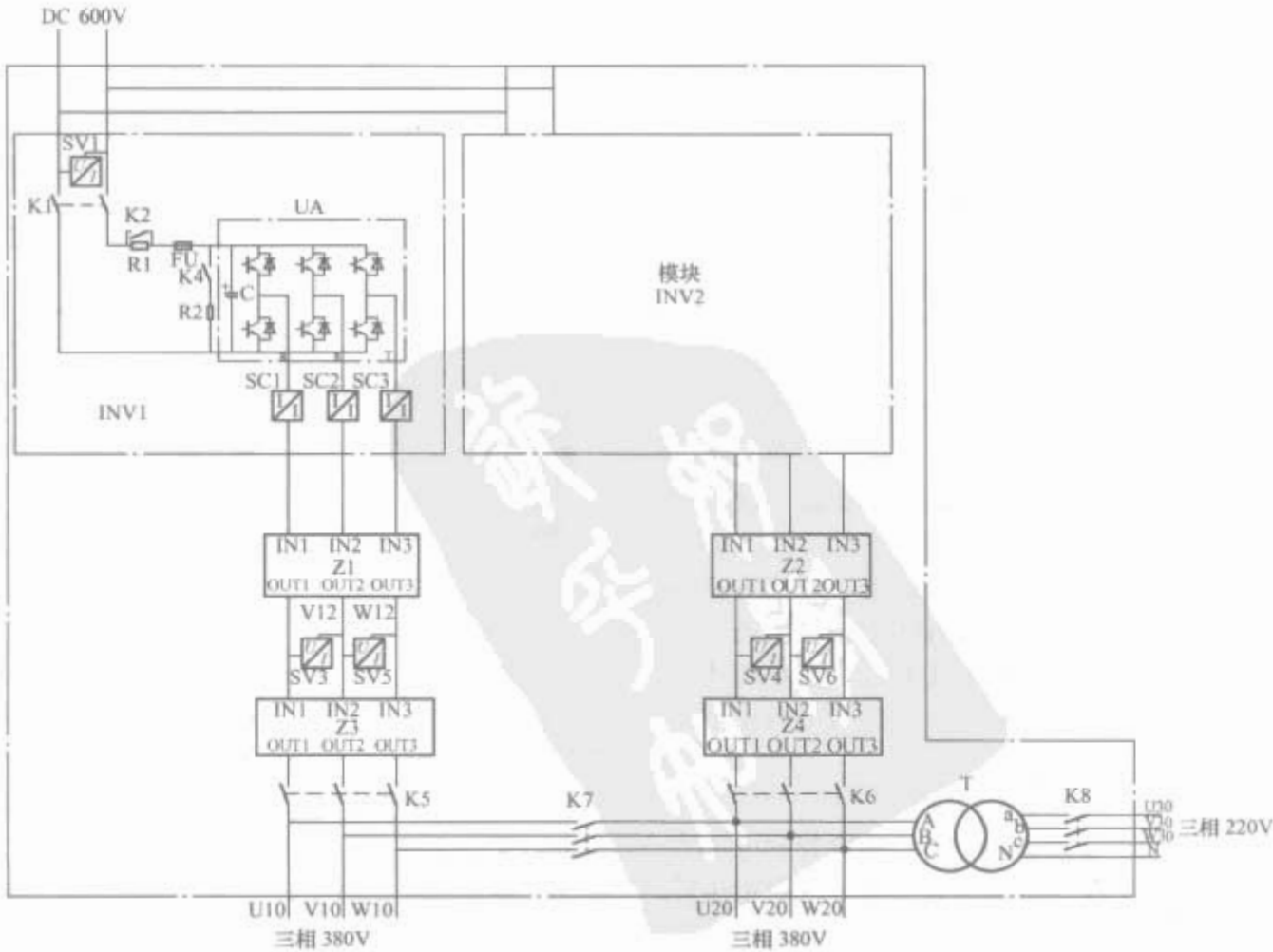


图 2.4-5 TGF23 系列客车电源电路

同。TGF20 系列电源变换箱包括一台 50kVA 的逆变电源装置和一台 8kW 的 DC110V 充电机装置；逆变器与 DC110V 充电机在电气上相互独立，并具有输入输出隔离接触器，当出现故障时，可以实现电气上的完全隔离。

TGF23 系列客车电源变换箱应用于 25T 型客车上，包括 TGF23A 型（软硬车用）、TGF23B 型（高包车用）、TGF23C 型（餐车用）和 TGF23D 型（高寒高包车用）。TGF23 系列电源变换箱包括 2 台 35kVA 的逆变电源装置和 1 台不小于 12kVA 的变压器。TGF23 系列客车逆变器箱电气原理完全相同，均采用 DC-AC 变换技术，由 2 台 35kVA 逆变器及一套 12kVA/15kVA 三相四线隔离变压器构成，2 台逆变器之间可相互转换，互为冗余。其中逆变电源为空调以及其他车载交流 380V 用电设备供电；变压器为 AC380V/AC220V 用电设备供电。

3.1.3 结构

3.1.3.1 TGF20 系列客车电源结构

TGF20 系列客车电源结构如图 2.4-6 所示。控制装置位于箱体右下部，逆变模块位于箱体右部，控制箱的后面；充电机位于箱体中部，滤波器位于箱体左部。TGF20 系列（行李车用）客车电源变换箱的内部布置与软、硬卧车的相反：控制装置位于箱体左下部，逆变器位于箱体左部，控制箱的后面；充电机位于箱体中部，滤波器位于箱体右部。

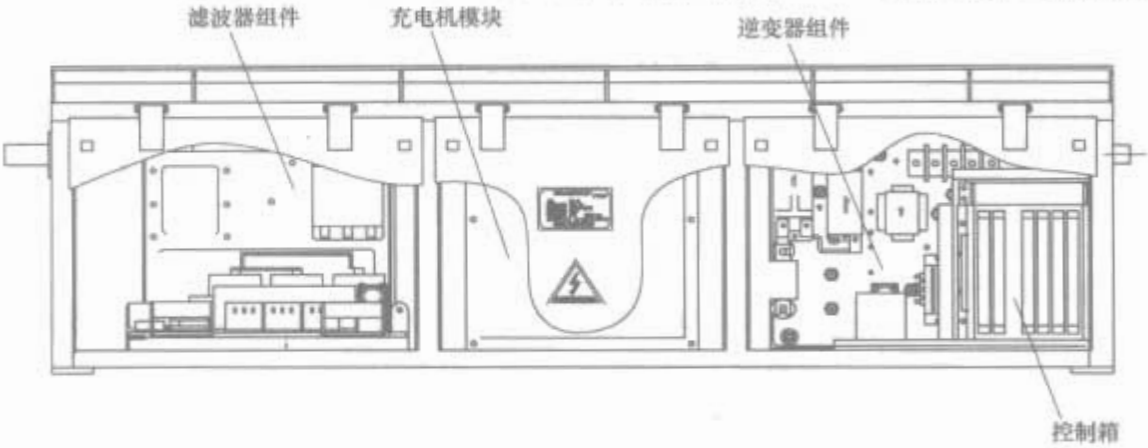


图 2.4-6 TGF20 系列客车电源结构示意图

3.1.3.2 TGF23 系列客车电源结构

TGF23 系列客车电源结构如图 2.4-7 所示，将控制装置、主断路器、充电电阻、充电接触器、快速熔断器、逆变模块、电流传感器、电压传感器、110V 滤波器集成为一个部件，位于箱体中间腔体；箱体两端放置 LC 滤波器、EMI 滤波器、输出接触器和变压器。

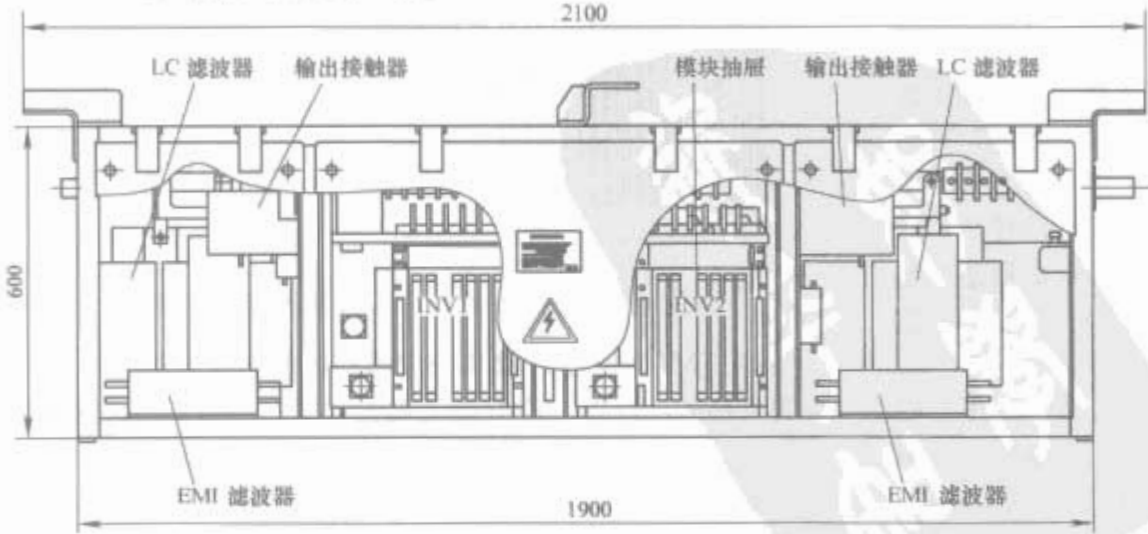


图 2.4-7 TGF23 系列客车电源结构示意图

3.1.4 三相逆变电源工作原理

3.1.4.1 三相桥式逆变电路

在三相逆变电路中，应用最广的是三相桥式逆变电路，

采用 IGBT 作为可控元件的电压型三相桥式逆变电路如图 2.4-8 所示。电路由 6 个 IGBT（VT1~VT6）组成，VD1~VD6 为感性负载提供续流回路，完成无功能量的续流和反馈。

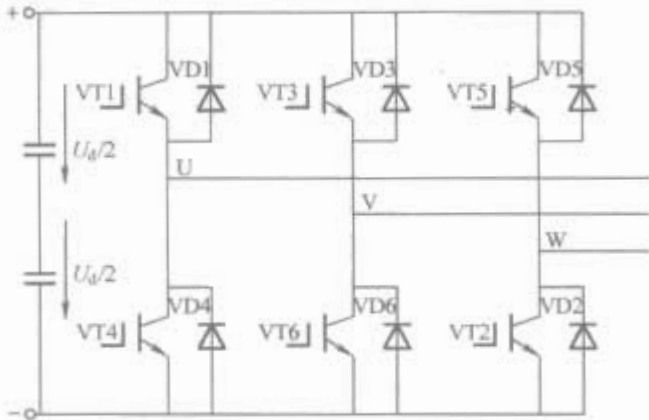


图 2.4-8 采用 IGBT 作为可控元件的电压三相桥式逆变电路

电压型三相桥式逆变电路的基本工作方式是 180° 导电方式，即每个开关管的导电角度为 180°，同一相上下两个管交替导电，各相开始导电的时间依次相差 120°。这样，在理想情况下，在任一瞬间，将有 3 个开关管同时导通。

实际应用中电路控制采用 PWM 调制技术，为使输出波形按正弦规律分布，利用正弦调制波与三角载波进行比较产生所需的开关动作信号。正弦调制波决定了输出电压的频率和幅值，三角载波决定了逆变电源开关动作的频率，为输出对称平衡的三相电压，可将互差 120° 的 3 个正弦调制波与同一三角载波比较产生所需的开关控制信号控制开关管顺序导通。依据 $U/F = \text{常数}$ 实现软起动。

输出端配有正弦波滤波器及 EMC 滤波器，以保证输出电压谐波含量小于 10% 及减小电磁干扰。具有输入输出隔离接触器及转换接触器，当出现故障时，可以自动实现电气上的完全隔离及故障转换。过分相区时，逆变器失电停止工作，过分相区后 30s 后，能自动软起动。控制装置采用标准机箱，应用单片机控制技术，对外部指令识别、系统状态判定、故障诊断及显示实行全面管理，通过 RS485 接口与 RS485/LonWorks 网关相连，实现与列车网络系统的互连，可方便地进行网络集中控制和信息查询。

3.1.4.2 三相逆变模块

逆变模块是三相逆变电源的核心部件，其功率开关元件 IGBT 具有开关频率高、驱动简单、损耗低的特点。

目前应用于客车电源上的 IGBT 三相逆变模块由以下几部分组成：

- (1) 电容组件。通过电容低感母排与功率器件 IGBT 连接。
- (2) IGBT 元件。
- (3) 驱动装置。

此模块的特点是：集成了功率器件、储能部件、驱动电路、温度传感器、吸收部件、散热器；元件面密封，压接型散热器，叠层母排连接；部件拆卸方便；结构紧凑、简洁、有层次感；功率线及控制线连接方便。

- (1) 驱动装置。在逆变模块的设计中，驱动电路的设计

较为重要。驱动电路包含脉冲分配和门极驱动电路：脉冲分配电路的作用是在桥式电路中将输入脉冲按规律分配给每个桥臂上的开关元件，并满足最小开通时间、最小关断时间、死区时间等的限制；门极驱动电路的作用是将脉冲分配板输出的脉冲信号转变为适合 IGBT 驱动的信号，对 IGBT 的开关进行控制，并对 IGBT 器件故障进行检测与保护。脉冲分配和门极驱动是逆变模块的重要环节，是保证功率开关器件安全开通和关断的重要组成部分。

IGBT 门极驱动电路一般应具备三个基本要素：

- 1) 驱动放大。大的栅极电流是驱动 IGBT 的基本要求。
- 2) 电气隔离。由于 IGBT 在电力电子设备中多用于高压场合，故驱动电路应与整个控制电路在电位上严格隔离。这种隔离包括驱动信号的隔离和电源的隔离。
- 3) 保护功能。驱动电路应具有器件保护及故障反馈功能。

(2) 三相逆变电源控制。逆变电源控制箱采用 36R 标准机箱，包含输入输出板、电源板、逆变器板、主控板、风扇控制板共 5 块插件。

1) 控制功能。开关电源板将控制箱的输入电源 DC110V 转化为其他插件所需要的 $\pm 24V$ 、 $\pm 15V$ 、 $\pm 5V$ 。输入输出板包括数字量输入和输出 2 个环节：数字量输入环节主要通过光电隔离和转换将外部 110V 的指令信号，如系统工作命令、系统复位指令转换成系统管理单元能够识别的高、低电平信号；数字量输出环节主要将系统的高低电平信号经过隔离转换成 110V 信号，为接触器线圈提供工作电压或以 110V 信号向外提供系统的状态。逆变控制板与逆变器模块配合共同完成逆变功能。主控板包括故障诊断、系统管理、计算机通信接口等部分，完成接收指令、发送信息、流程控制的任务。风扇控制板完成对客车电源内部冷却风扇的控制。

2) 主控板控制。DC110V 控制供电后，逆变器执行自检，时间不超过 5s。如果电压传感器检测到 DC600V 电源电压低于 $DC490V \pm 5V$ ，则放电接触器吸合，DC600V 主接触器处于断开，预充电接触器处于断开，交流输出接触器断开；如果电压传感器检测到主电路电压超过 $DC490V \pm 5V$ ，则延时不得超过 5s，断开放电接触器，吸合主接触器，开始预充电（此时预充电接触器处于断开状态）。当电压传感器检测到母线电压和逆变器支撑电容上的电压差小于 DC50V 时，预充电接触器吸合，短接预充电电阻，结束预充电状态（此时放电接触器处于断开状态），预充电时间不得超过 5s。预充电结束后，检测距离最近一次 DC600V 电源停止供电时间。当时间已经超过 55~60s，保证交流输出满足要求时，交流输出接触器吸合，逆变器按 VVVF 起动输出；当时间不到 55~60s 时，延时等待；时间达到 55~60s 后，保证交流输出满足要求时，交流输出接触器吸合，逆变器按 VVVF 起动输出。对于为餐饮电器供电的逆变器，从 DC600V 电源有电到逆变器正常交流输出的时间不得超过 30s，减载工作时应满足非餐饮电器用逆变器起动时间的要求。

在工作过程中，如果逆变器出现任何交流输出不正常的现象，则交流输出接触器断开，以免影响负载。如果出现不可恢复故障、逆变器不能正常工作或能引起逆变器内部损坏，则断开 DC600V 主接触器和预充电接触器，放电接触器吸合。

在 TGF23 系列客车电源中，2 台逆变器相互热备用。当某一台逆变器由于发生故障停止输出时，另一台逆变器应同时停止输出。如果是可恢复故障，2 台逆变器应自动重新

起动；如果是不可恢复故障，应先使逆变器减载信号有输出，然后延时 30s 进行热备转换，正常的逆变器重新启动。

3) 逆变器控制板控制。逆变器的控制采用传统的恒压频率比 ($U/f = C$) 控制方式，使用电压脉宽调制 (SPWM) 方法，使输出端得到一系列幅值相等而宽度不相等且按正弦规律变化的脉冲，用这些脉冲来代替正弦波或所需要的波形。按一定的规则对各脉冲的宽度进行调制，既可改变逆变电路输出电压的大小，也可通过改变调制频率改变输出频率。

逆变器控制板的功能是接收主控板的频率给定信号，对中间直流环节电压、逆变器输出电流、逆变器输出电压等控制参数进行采样、调整以及 A/D 转换，按 $U/f = \text{常数}$ ，利用 SPWM 产生三相 PWM 脉冲，实现逆变器的变压变频控制。另外还具有中间直流环节过电压、输出电流过电流、输出过载、开关元件故障、三相不平衡、输出短路等保护功能。

(3) 输出滤波。输出滤波主要采用下列滤波器：

1) 输出 LC 滤波器。逆变模块输出的是等幅不等宽的一系列矩形波形，其脉宽按正弦规律变化，PWM 波电压具有很高的 dv/dt 值及谐波含量。如果直接给辅助电机供电，将对辅机造成很不利的影响，如电机绕组产生过电压、损坏电机绝缘、缩短电机寿命等。为减小 PWM 波对辅助电机的不利影响，需要滤除高频分量，获得准正弦波输出，可采用低通滤波电路，如图 2.4-9 所示。在这种情况下，电感、电容的参数是由滤波器的截止频率决定的。输出滤波器的截止频率 f_c 的定义式为

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.4-1)$$

这样可以得到 L 、 C 的乘积，然后再根据阻抗电压的要求计算得到 L 、 C 值。

考察一个滤波器的性能，首先要看它对谐波的抑制能力，具体可以从 THD 值来体现。另外所选择的滤波器还要减少对逆变器的附加电流应力。电流应力增大，除使器件损耗加大外，还使功率元件的容量增大，增加了系统的成本。但是，THD 要小，与滤波器引起的附加电流应力小往往是矛盾的，而且 L 、 C 的选择不仅要满足滤波的要求，还要综合考虑其质量、尺寸及成本等因素。

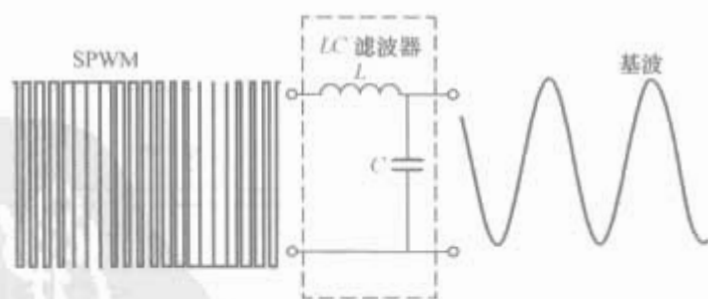


图 2.4-9 逆变器输出 LC 滤波器作用示意图

2) EMI 滤波器。EMI 滤波器是以能够有效抑制电磁干扰为目标的滤波器。EMI 滤波器大多采用多级 LC 滤波电路串联，为了在阻带范围获得最大衰减，滤波器输入端和输出端的阻抗必须与与之连接的噪声源阻抗相反，即对低阻抗噪声源，滤波器必须为高阻抗（大的串联电感）；对高阻抗噪声源，滤波器就应为低阻抗（大的并联电容）。由于实际应用中电源装置及负载的阻抗的不确定性及多样性，要取得理想的效果，EMI 需要根据实际情况调节参数，使其阻抗匹配。

3.1.5 主要技术参数

三相逆变电源的主要技术参数见表 2.4-2。

3.2 客车充电机箱

3.2.1 系统组成

25T 型客车充电机箱是为 25T 型客车研发的。整个系

统由充电机和单相逆变器组成。它将输入的 DC600V 由充电机转换成 DC110V，提供给客车照明、110V 蓄电池充电及其他 110V 负载；将 DC110V 的输入由单相逆变器转换成单相 AC220V、50Hz 输出，供给单相负载使用。25T 型客车充电机箱系统及外形如图 2.4-10 和图 2.4-11 所示。

表 2.4-2 三相逆变电源的主要技术参数

型 号		TGF20	TGF23
输入电压	额定电压(V)	DC600	
	最高电压(V)	DC660	
	最低电压(V)	DC500	
	纹波脉动系数(%)	<15	
逆变器额定容量(kVA)		50	2×35
充电机额定输出容量(kW)		≥8.0	
变压器额定输出容量(kVA)			12(TGF23、TGF23A/B/C)15(TGF23D)
逆变器额定输出电压基波有效值(V)		三相 AC 380(夏季工作) 三相 AC 220(冬季工作)	三相 AC 380
频率(Hz)		50±1(夏季工作) 35±0.7(冬季工作)	50±1
逆变器额定输出特性			
基波有效值(V)		三相 AC×380(夏季工作) 三相 AC×220(冬季工作)	基波有效值三相 AC×380
频率(Hz)		50±1(夏季工作) 35±0.7(冬季工作)	50±1
谐波含量(%)			<10
波动范围(%)			±5
尖峰电压(V)			≤1000
电压上升率(V·μs)			≤500
充电机输出特性	额定输出电压(V)	DC118~125(随温度补偿可调)	
	输出电流脉动(%)	<10	
	输出电压纹波(V)	<3	
控制电压(V)	额定值	DC110V	
	最低值	DC 77V	
	最高值	DC 137.5V	
	纹波峰值	≤10	
控制方式		采用标准机箱，应用单片机控制技术，对外部指令识别，系统状态判定、故障诊断及显示实行全面的管理、控制，通过 RS485 接口与 LonWORKS 网关相连，实现与列车网络系统的互连，可方便地进行网络集中控制和信息查询，与外部进行信息交换	
冷却方式		自冷	
效率(%)		>90	
保护		系统具有贯穿短路、过电压、欠电压、过电流、散热器过热等保护	

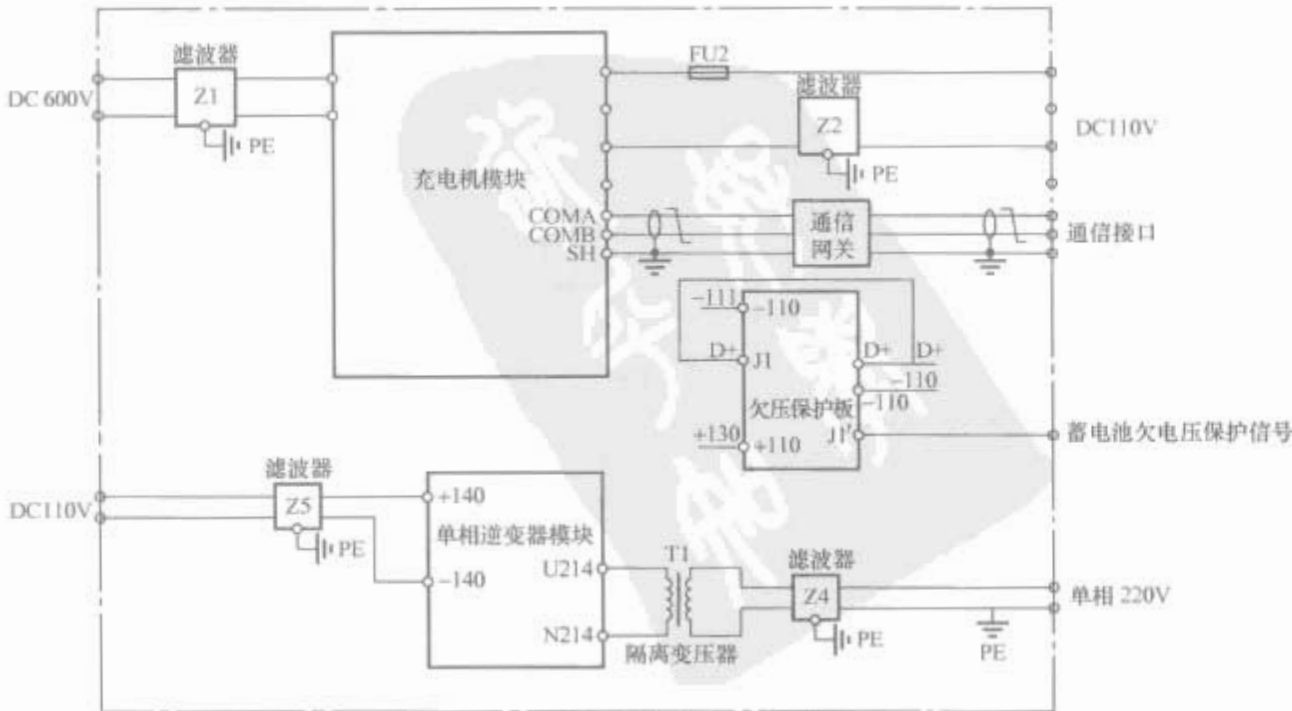


图 2.4-10 25T 型客车充电机箱系统图

3.2.2 25T 充电机箱主要技术参数

25T 充电机箱主要技术参数见表 2.4-3。

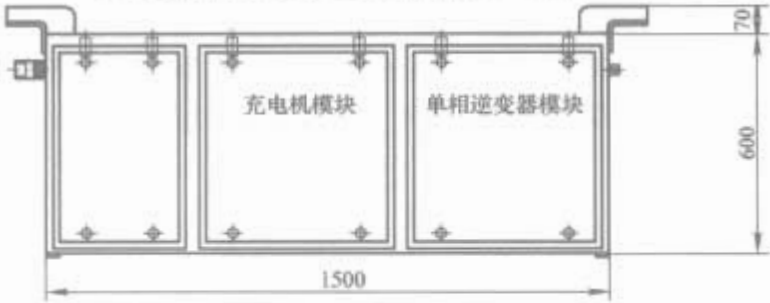


图 2.4-11 25T 型客车充电机箱外形示意图。

表 2.4-3 25T 充电机箱主要技术参数

技术参数		指 标
箱体外壳防护等级		IP54
噪声(dB)		小于 70(1m 处)
振动与冲击		符合 TB/T 3058—2002《铁路应用机车车辆设备冲击和振动试验》1 类 A 级
电磁兼容要求		满足 TB/T 3034—2002 标准要求
质量(kg)		300
工作环境温度(℃)	常温型	—25~+45
	低温型	—40~+45
贮存环境温度(℃)		—45~+70
最大相对湿度(%)		最大相对湿度为 95%(该月月平均最低温度为 25℃)

3.2.3 DC110V 充电机模块

DC110V 充电机模块(以下简称充电机)将 DC600V 变换成 DC110V,适用于客车照明、110V 蓄电池充电及其他 110V 负载。

(1)主要技术参数。DC110V 充电机模块主要技术参数见表 2.4-4。

(2)工作原理。25T 客车无论兼容供电还是 DC600V 供电,都需要充电机将 DC600V 或三相交流 380V 变换成 DC110V 供给蓄电池充电及为控制、照明等负载供电。从维护系统的安全性和可靠性来考虑,充电机实际上是供电系统中最重要的设备,一旦充电机发生故障,蓄电池将无法充电,最终可能使本车挂在蓄电池上的所有设备都无法启动和工作。为此,设计了充电机,其核心是充电机模块,原理框图如图 2.4-12 所示。它采用半桥或全桥开关模电路拓扑的交频 DC-DC 变换技术,图 2.4-13 所示为半桥式开关变换电路。

表 2.4-4 25T 充电机模块主要技术参数

技术参数		指 标
额定输入电压(V)		DC600
电压变化范围(V)		DC500~DC660
输入电压波动(%)		±5%
标称输出电压(V)		DC119~DC123(随温度补偿可调)
标称输出功率(kW)		8
输出总电流(A)		68
充电电流最大值(A)		25
输出电压纹波(V)		≤3
输出电流纹波系数(%)		≤10
控制电源(V)		DC77~137.5
效率(%)		≥92(标称输出负载)
耐压	DC600V 输入直流回路	2500V/50Hz, 1min
	DC110V 输出直流回路	1000V/50Hz, 1min

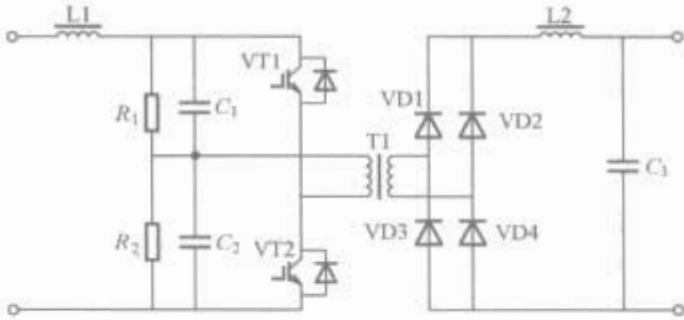


图 2.4-13 DC-DC 半桥式开关变换电路

DC600V 供电客车的 DC-DC 变换,主要是通过 IGBT 半桥(全桥)式逆变电路将 DC600V 电压变换成占空比可调的高频方波电压,经变压器降压、隔离后,由 VD1~VD4 共 4 只快速软恢复二极管组成的桥式整流电路,对变压器二次侧输出的脉冲电压进行整流,经过 LC 滤波器滤波后输出平滑的直流电源,供给直流负载和蓄电池;兼容供电客车则是先将 AC380V 整流后,变成 DC540V,然后采取与 DC600V 输入相同的 DC-DC 变换。控制方式采用 PWM 方式。

针对低温应用环境(最低达-40℃),充电采取了温度补偿措施,温度补偿曲线如图 2.4-14 所示。

开关变换电路中 IGBT 的开关频率达到 20kHz 以上,避开了音频区域,可减小充电机的电磁噪声。

采用 20kHz 的工作频率,主要是为了减小变压器、滤波

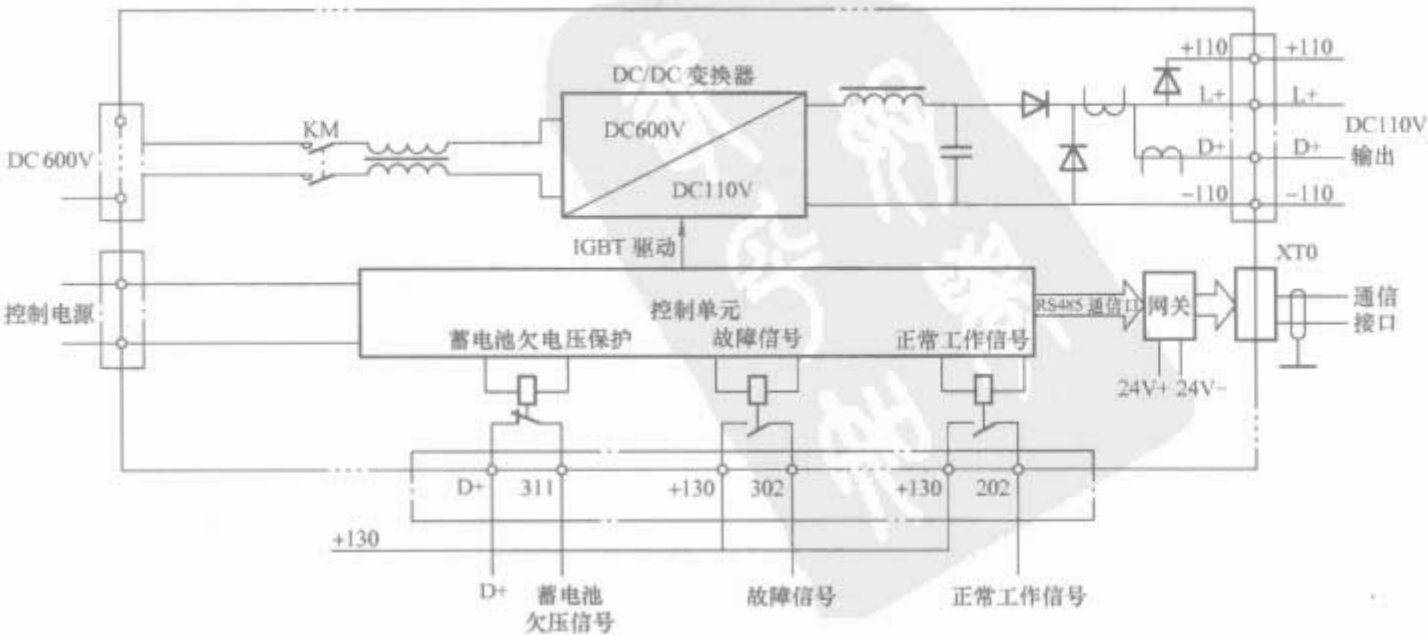


图 2.4-12 充电机模块原理框图

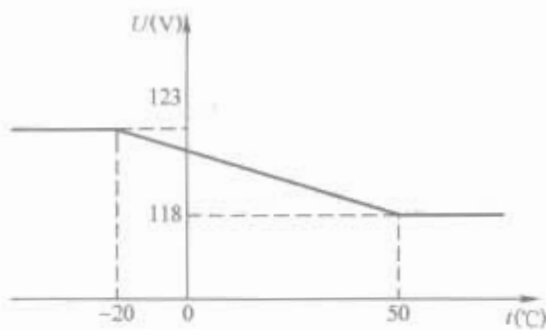


图 2.4-14 温度补偿曲线

器的体积。变压器的一次侧或二次侧的电压为

$$U = kfNBS \tag{2.4-2}$$

式中： U 为变压器绕组端电压； k 为波形系数； f 为工作频率； N 为线圈匝数； B 为工作磁通密度； S 为磁有效面积。

从式 (2.4-2) 中可以看出，对于相同的 U 和 B ，若工作频率 f 提高， N 和 S 可相应减小； N 的减小即绕组的匝数减少，意味着变压器的铜重可以减小； S 的减小即变压器铁心面积减少，铁重减小，而铜线和铁心将决定变压器的主要有效体积和质量。当频率提高到 20kHz 时，变压器的铁心非常小，绕组匝数大幅减小。同样，高频输出脉冲（对应 40kHz）的滤波电感和电容也明显减小，这就是高频化的效果。但是高频带来的负面影响是损耗的增加。IGBT、变压器、整流二极管、滤波电抗等在高频时的损耗会明显增加，相应地要考虑导体集肤效应的影响。

恒压限流充电：一般 25T 型客车采用碱性中倍率电池，碱性电池充电的要求在蓄电池电压低时采取恒流充电的方式，在电压充到一定程度时采取恒压浮充的方式，如图 2.4-15 所示。根据标准要求，限流充电值为 0.2C5，25T 型客车用蓄电池容量为 C5=120Ah，5h 放电电流为 24A，因此恒流充电电流限制在 25A。

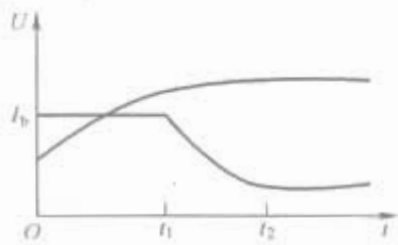


图 2.4-15 恒压限流充电的 IU 曲线

输出限流：充电机的输出电流分三个部分：一部分向本车蓄电池充电；另一部分供给本车照明、控制等负载；还有

一部分通过二极管向列车母线供电。当充电机的输出电流超过其允许电流（如 70A）时，其限流控制功能起作用，使输出电压降低；输出电压降低后充电机减小或停止向其他客车输出电流，同时还可以减小蓄电池电流，以使总的输出电流降低，如图 2.5-16 所示。

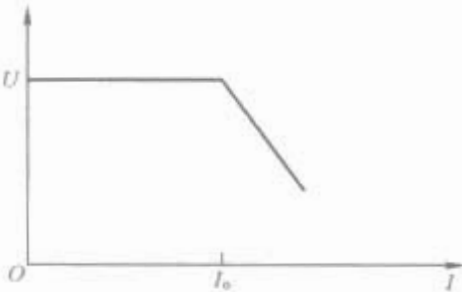


图 2.4-16 充电机输出限流特性

3.2.4 单相逆变器模块

单相逆变器（以下简称逆变器）将 DC110V 的输入变换成单相 AC220V、50Hz 输出，供给单相负载使用。

(1) 主要技术参数。单相逆变器模块的主要技术对参数见表 2.4-5。

表 2.4-5 单相逆变器模块主要技术参数	
技术参数	指 标
标称输入电压 (V)	DC110
输入电压波动范围 (V)	DC77~DC137.5
额定输出电压及频率	单相 AC220V±11V, 50Hz±0.5Hz
输出电压波形	正弦波, 31 次以下相对谐波含量≤3%
额定输出容量 (kVA)	3.5
过载能力	20%负载时>1min 额定效率≥85%
保护功能	当输入电压低于 72±3V 时, 逆变器输入欠电压保护动作, 停止输出 当输入电压高于 144±6V 时, 逆变器输入过电压保护动作, 停止输出 当输出负载电流的有效值超过 19.1A (1.2 倍额定输出电流)±5% 时, 逆变器输出过电流保护动作, 停止输出 当逆变器自身内部出现过电流、短路、过电压、欠电压或过热时, 逆变器保护应动作

(2) 工作原理。单相逆变器原理框图见图 2.4-17，主要包括输入滤波部分、升压斩波部分（DC-DC）、逆变部分（DC-AC）、输出滤波部分和控制单元部分。

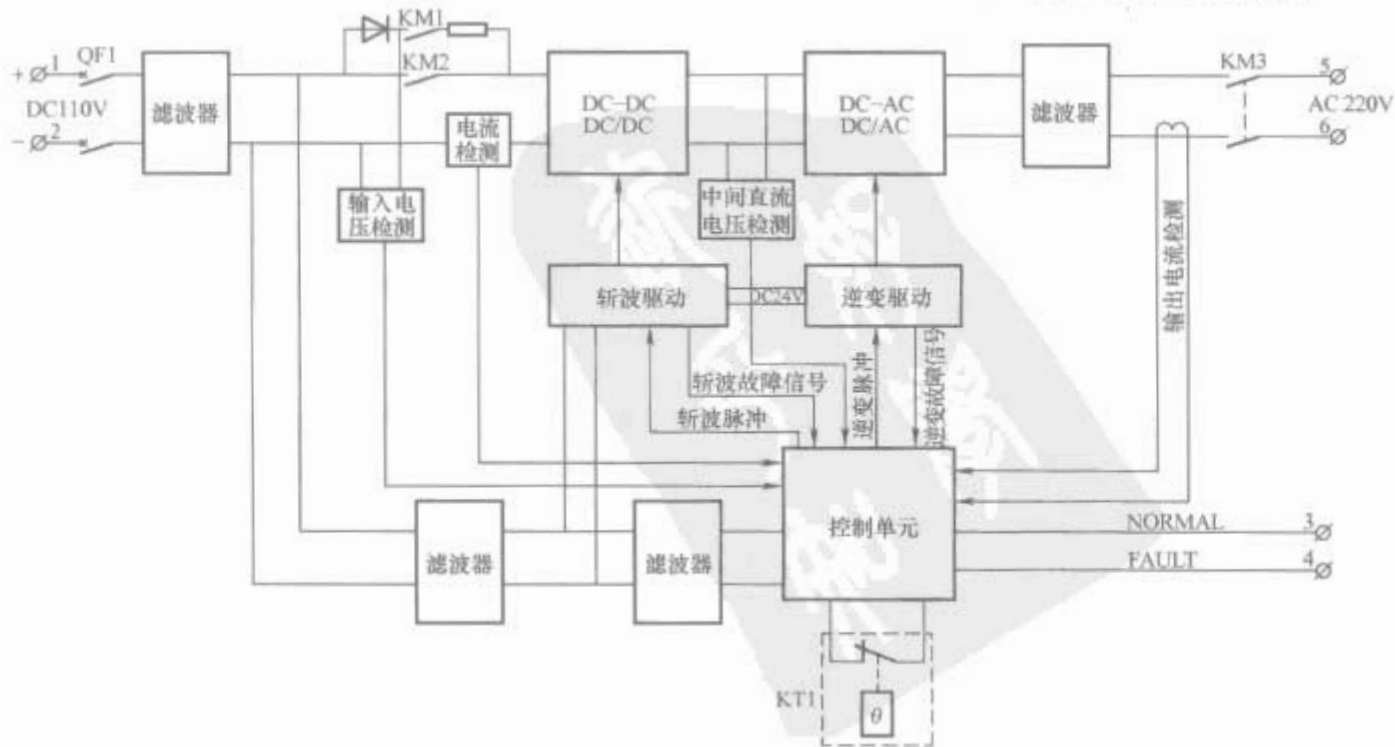


图 2.4-17 单相逆变器原理框图

逆变器的控制采用 16 位微机控制技术。斩波驱动采用 PWM 波驱动方式，升压斩波环节保证了有适当的中间直流环节电压。中间直流环节电压信号通过电压传感器反馈给控制单元，控制单元根据反馈值来调节斩波脉冲的占空比，从而使中间直流环节电压维持稳定。逆变驱动采用 SPWM 波驱动方式，把中间直流环节电压逆变成稳定的单相交流 220V 电压。控制单元部分对斩波故障信号、逆变故障信号、输入电压信号、输入电流信号、输出电流信号进行检测，并根据所检测到的信号进行短路保护、过欠压保护、过电流保护等，从而保证系统可靠、安全运行。KT1 是一个带动断触点的温度继电器，当散热器温度过高时，动断触点跳开，给出过热保护信号，逆变器停止输出。

除输出滤波板外，逆变器内部还有控制板、驱动板和 IPM 板。控制板是整个逆变器的控制核心，采用微机控制。DC110V 经滤波后直接进入控制板，由控制板自带的开关电源电路变换成 +5V 和 ±15V 供给控制电路使用。接触器由控制板直接控制，而斩波和逆变脉冲则由控制板发出后，经驱动板和 IPM 板分别驱动斩波管（IGBT）和逆变管（IPM）。驱动板上所带的开关电源电路将 DC110V 变换成驱动电路所需的 DC24V 电源，除供给驱动板自身外，还输出给 IPM 板。

3.3 电气综合控制柜

TKDD 型铁路客车电气综合控制柜（以下简称综合控制柜）用于 DC600V 供电的客车，是集成了供电控制、空调控制、蓄电池欠压保护、照明控制等功能单元于一体的智能型综合控制柜。其控制核心采用可编程控制器（以下简称 PLC）。PLC 通过微型可编程序终端（以下简称显示触摸屏）接受各种指令并自动执行相应的操作步骤，对电气系统运行中出现的各种故障及时进行诊断、指示并保护。综合控制柜具有检测、控制、诊断保护、信息提示、联网通信功能，实现供电及控制系统的综合控制，可进行车对车通信，并逐步实现车对地、地对车的计算机联网通信。根据所控空调机组的数量，它主要分 1T1 和 1T2 两种，1T1 表示控制一台空调机组，1T2 表示控制两台空调机组。

其主要技术特点是：实现了客车电气控制系统的小型化、智能化、集成化和系统化；根据预设参数实现自动控制，减轻了操作人员的工作强度，避免由于人为误操作引起的事故，便于操作和维护；对整车电气系统参数进行实时监测，出现故障时及时进行保护动作，避免了由于保护不及时而引起的严重后果；可对轴温、防滑器的状态进行监视和显示；充分考虑了整车各个电气功能部件的协调工作，整个电气系统工作更加安全可靠；综合控制柜的控制方案以自动为主，同时考虑控制系统故障的应急措施，包括故障情况下的手动应急措施。

3.3.1 系统功能

3.3.1.1 供电控制

控制柜的电源有 2 路供电：分“自动”和“试验 I 路”、“试验 II 路”位。正常情况下，选择开关置于“自动”位，自动控制流程如图 2.4-18 所示。

(1) 正常情况下，转换开关置于“自动”位。I 路、II 路均有电，设定车厢号后，PLC 按照均衡供电原则，奇数号车厢选择 I 路供电、偶数号车厢选择 II 路供电，I 路和 II 路互锁，显示屏显示相应信息，电源指示灯亮。

如果 I 路有电、II 路无电，则所有车厢 PLC 通过检测可自动选择 I 路供电，负载减半运行，同时在显示屏上提示



图 2.4-18 自动控制流程图

相应信息。此时如果 II 路重新供电，则偶数车厢 PLC 通过检测可重新选择 II 路供电。

如果 II 路有电、I 路无电，则所有车厢 PLC 通过检测可自动选择 II 路供电，负载减半运行，同时在显示屏上提示相应信息。此时如果 I 路重新供电，则奇数车厢 PLC 通过检测可重新选择 I 路供电。

可以通过触摸屏的电源控制菜单和提示选择或转换供电回路。

在 I 路、II 路都有电，奇数号车厢 I 路供电、偶数号车厢 II 路供电的情况下，如果 I 路（II 路）电源出现过电压故障，PLC 自动转换到另一路电源供电，同时负载减半运行。当电源电压值恢复正常，通过触摸屏操作解除故障保护或电源重新供电，通过 PLC 检测后，PLC 自动转换回原供电回路，负载恢复全载运行。2 路供电回路重新供电时，PLC 将自动解除保护，转换到原供电回路。

在一路有电，另一路无电，所有车厢都是同一路供电的情况下，如果供电回路出现故障，则 PLC 停止供电，不进行转换。

在一路正常，另一路存在故障未消除，车厢供电已经进行了一次转换的情况下，如果供电回路再出现故障，则 PLC 停止供电，不进行转换。

故障排除后，可以通过触摸屏上的“电源控制”菜单，按下“停止供电”或“自动供电”触摸开关解除故障保护。通过 PLC 检测后，PLC 自动转换回原供电回路，负载恢复全载运行。

故障排除后也可以通过转换开关由“停止”位转换到“自动”位，PLC 自动解除保护，转换回原供电回路，通过 PLC 检测后，负载恢复全载运行。

出现过电压故障过分相区后，2 路供电回路重新供电时，PLC 将自动解除保护转换到原供电回路，负载恢复全载运行。

(2) 试验时，可将转换开关置于“试验 I 路”或“试验 II 路”，人为选择 I 路供电或 II 路供电，此时 PLC 只进行检测报警，不能进行电源回路的转换。

(3) 主电路中接有电流传感器、电压传感器，并设置在线绝缘保护装置（6~150mA 可调），显示触摸屏上可显示主电路的电压、电流、DC110V 母线电压、本车蓄电池电压、电源状态、逆变器输出电压、轴温、防滑器状态等信息。当某路电源出现过电压、绝缘等故障时，显示触摸屏显示故障提示，相应电源故障灯亮，可以按下“回主画面”触摸开关返回主画面，此时画面上出现“××故障”文字，且

背景变为闪烁提示。

自动供电时，当弱风、空调空气预热器或电热运行时，供电电压大于 DC660V 时间超过 10s，PLC 自动切断当前供电回路，转移到另一无故障的回路供电。当制暖设备没有运行时，供电电压大于 DC660V，时间超过 20s，PLC 自动切断当前供电回路，转移到另一无故障的回路供电。

另外，自动供电方式下，如果 DC600V 漏电超过 PLC 设定值（出厂设定 100mA），或漏电瞬时值超过 150mA，将及时切断故障供电电源，触摸屏显示电源绝缘故障的信息，电源绝缘故障灯亮，停止供电。

供电过电压和主电路漏电超标故障是不可自动恢复性故障，应通过以下两种方法来清除故障提示：①触摸触摸屏供电控制菜单，重新选择菜单中供电自动；②将供电转换开关从停止位转到自动位。

(4) 正常供电时，DC600V 电源给温水箱、车下电源箱、客室电热供电，逆变器为空调机组、开水炉、伴热等负载供电，DC110V 电源向照明、车下电源箱控制、轴温报警器、防滑器、水位显示仪等供电。过压保护自动供电模式下，当弱风、空调空气预热器或客室电热运行时，供电电压大于 DC660V、时间超过 10s，PLC 自动切断当前供电回路，转移到另一无故障的回路、由其供电。当制暖设备不运行时，供电电压大于 DC660V 时间超过 20s，PLC 自动切断当前供电回路，转移到另一无故障的回路供电。

3.3.1.2 空调控制

空调控制功能通过转换开关分为“自动”、“试验暖”、“试验冷”三种。

(1) 正常情况下，转换开关置于“自动”位。电源供电开始后，PLC 控制空调机组自动进入“自动”运行。PLC 根据当前逆变器状态、控制方式以及车厢里温度传感器检出值与预先设定的“制冷”、“制暖”温度值进行比较后，进行空调机组的“自动”运转。空调机组有 5 种工况：“通风”、“半冷”、“半暖”、“全冷”和“全暖”。“制冷”温度设定值为空调机组从“半冷”工况转入“通风”工况时的临界温度；“制暖”温度设定值为空调机组从“通风”工况转入“半暖”工况时的临界温度。

可以根据显示触摸屏上的菜单和提示，在逆变器“非冬季模式”时强制选择“通风”、“半冷”、“全冷”；在逆变器“冬季模式”时强制选择“通风”、“半暖”、“全暖”等运行方式，此时空调机组不受温度控制，按下“全自动”触摸开关可以返回受温度控制“自动”状态。

制冷时，通风机发生故障，相应冷凝风机、压缩机停止工作；冷凝风机发生故障时，相应压缩机停止工作；制暖时，通风机发生故障，相应空气预热器停止工作。

在“半冷”或“半暖”工况下，压缩机或空气预热器运行时发生故障，将停止运行，并自动切换到另一组压缩机或空气预热器起动运行；在“全冷”、“全暖”工况下，运行发生故障，有故障的压缩机或空气预热器停止运行，而无故障压缩机或空气预热器继续运行。

空调机组有故障时，通过按下显示触摸屏上的“停空调”停止空调运行，故障排除后，再按下“起空调”空调机组重新运行后，PLC 通过检测可以重新启动空调机组。

故障排除后也可以通过转换开关由“停止”位转换到“自动”位，空调机组自动转换到“自动”运行状态，通过 PLC 检测后，空调机组恢复运行。

空调“全自动”运行时，空气预热器与客室电热器联动，按下“停电热”可取消联动。联动取消后，客室电热的

启停靠手动控制。客室电热与冷凝风机互锁，在“非冬季模式”时，客室电热不能起动。

(2) 试验时，可将转换开关置于“试验冷”或“试验暖”，人为选择制冷工况，起动通风、冷凝风机或制暖工况起动通风。在制冷工况下起动压缩机 1，适当延时后再起动压缩机 2。在制暖工况下，起动加热 1，适当延时后再起动加热 2。此时 PLC 只能对空调机组进行监测，不进行保护动作。

(3) 机组主回路中接有电流传感器，显示触摸屏上可以显示空调机组的运行工况、压缩机或空气预热器运行状况、累计运行时间及电流值，可以显示“制冷”、“制暖”设定温度值。当机组出现过载、过电流、缺相及三相不平衡故障时，显示触摸屏显示故障提示状态，空调故障灯亮，可以按下“回主画面”触摸开关返回主画面。

(4) 空调机组的压缩机及空气预热器按照累计时间运行。半冷或半暖时累计时间少的机组起动运行 2h 后，自动转换到另一机组交替运行。累计运行时间多的机组达到 9997h 后，同一空调 2 台机组运行时间同时减去一定时间，以保证 2 台机组累计时间差不变。

(5) 空调新风口控制。空调机组加装电动新风调节门 1 个，空调自动模式下，新风调节门的开度受外气温度（简称外温）控制。通过控制电动新风调节门执行器的通电时间来控制新风调节门开度。

调节门开度分为全开、Ⅰ挡、Ⅱ挡、Ⅲ挡 4 挡。新风调节门开度与外温的关系见表 2.4-6。

表 2.4-6 新风调节门开度与外温关系

工况	外温 (℃)	KLD29TD	KLD35TD	KLD45TD
夏季制冷及通风	≥35	Ⅰ挡	Ⅰ挡	Ⅰ挡
	<35	全开	全开	全开
冬季制暖及通风	>0	全开	全开	全开
	-15~0	Ⅱ挡	Ⅱ挡	Ⅱ挡
	≤-15	Ⅲ挡	Ⅲ挡	Ⅲ挡

自动模式下，在工作电源正常时，控制电路根据外气温度进行风口增大/减小操作，风口从全开位进行减小操作到Ⅰ挡、Ⅱ挡、Ⅲ挡的通电时间。

电气控制系统依靠全开位反馈信号和通风时间进行开度控制。在新风调节过程中如果发现断电，恢复供电后新风调节装置重新调整，外温控制回差为±1.5℃。

综合控制柜 PLC 检测新风调节器是否机构卡死，判断条件为：风口增大操作时，通电时间超过 120s 无最大位置反馈信号视为故障；风口减小操作时，风口从最大位开始返回并计时，30s 后如果最大位信号仍然存在，视为故障。

对于采用 2 台空调机组的客车（如硬座车），位置反馈信号分开输入，输出控制信号并联使用（即同时增大，同时减小）。控制电路如果发现驱动机构故障，2 个新风驱动机构可以继续通电。

故障后综合控制柜显示相应的故障信息，空调故障指示灯亮，但机组其他电机正常工作。

3.3.1.3 蓄电池欠电压保护功能

25T 型客车采用 80 节 1.2V、120Ah 中倍率碱性蓄电池供应急使用。

综合控制柜设 2 级蓄电池欠电压保护功能：1 级为 PLC 保护，当 PLC 检测到本车蓄电池电压低于欠电压保护设定值时（允许用户调整，出厂设置 92~94V），触摸屏显示相

应故障信息,提示用户;2级保护为车下充电机保护(出厂设定欠电压动作电压92~94V,恢复值为96~98V,用户不可更改),当蓄电池电压低于92~94V时,欠电压保护继电器KM4失电释放,本车2级直流负载如非应急照明、信息显示、内端门等断电。

3.3.1.4 照明控制功能

25T型客车照明系统分应急照明和非应急照明两大类,所有照明均采用DC110V供电。应急照明采用母线DC110V电源,不受本车蓄电池欠电压保护影响,控制柜设置应急照明开关。应急照明负载包括:客车两端的应急灯、软硬卧车阅读灯、地灯、洗脸室灯。应急照明配合乘务员室的照明转换开关使用,转换开关位于“半灯”、“全灯”时,综合控制柜内KM7吸合,应急照明有电。

非应急照明包括终夜灯、半夜灯,采用本车蓄电池DC110V电源。本车蓄电池欠电压保护时,非应急照明灯具不能工作。终夜灯、半夜灯由安装在乘务员室的转换开关控制,照明分为“半灯”、“全灯”和“停止”。将转换开关置于“半灯”,终夜灯工作;置于“全灯”,终夜灯、半夜灯工作。

3.3.1.5 车下电源装置控制功能

25T型客车车下电源装置包括1台2×35kVA的逆变器、1台8kW充电机和1台15kVA三相四线输出隔离变压器。2个逆变器的线电压通过安装在综合控制柜的传感器来测量,逆变器的其他电气参数和充电机的电气参数通过安装在充电机箱的网关与车上Lon网LW1A、LW1B线路相连。逆变器、充电机与网关之间采用RS485通信,电源由充电机提供。

2个逆变器正常输出时相互独立,2路隔离输出,但互为热备用。一旦某一逆变器故障,正常工作的逆变器停止输出,2路输出并联,无故障逆变器软启动至正常值,同时输出逆变器减载硬线信号给综合控制柜,车内设备减载运行。

逆变器提供三相三线AC380V电源,一个逆变器主要给客车空调系统供电;另一个逆变器给隔离变压器供电;餐车中2个逆变器同时供电给厨房电灶;隔离变压器供电给车内单相负载、伴热、排风机等使用。

车下电源装置采用DC110V控制电源、DC600V电源。正常的开机操作顺序为先给控制电源、后强电;关机顺序为先关强电、后关控制电源。注意操作顺序错误容易导致车下电源故障。

如果车下电源故障,可以通过显示触摸屏查看故障代码。

3.3.1.6 输出单相AC220V电源

25T型客车安装1台3.5kVA单相逆变器,采用本车蓄电池DC110V供电,供本车交流插座(乘务员室、大走廊、软卧包间)、播音车影视控制柜和餐车电视使用。

正常工作时,综合控制柜输出AC220V电源,输出DC110V正常工作信号;故障时,交流无输出,输出DC110V故障信号。

3.3.1.7 保护与故障诊断功能

综合控制柜具有完善的故障诊断、保护功能,热继电器、过电流继电器与电子保护并存。由于PLC的模拟量输入点有限,并考虑到空调机组中通风机、冷凝风机负载较小,重点保护压缩机(空气预热器)负载,因此通风机、冷凝风机负载只用热继电器保护;压缩机(空气预热器)负载除电子保护外,还有过电流继电器保护,空气预热器还有熔断器保护,形成2级保护。

由于空调机组的制暖工况和制冷工况不会同时存在,因此空调机组中的压缩机和空气预热器共用3个单相电流传感器。3个电流传感器对压缩机(空气预热器)的三相工作电流进行实时采样,分别送入PLC的模拟量输入点,实时与PLC中预先设定的压缩机(空气预热器)额定电流值进行比较、判断,对压缩机(空气预热器)的工作实时进行报警或保护。

PLC对空调机组的保护功能有压缩机(空气预热器)过载保护、过电流保护、三相电流不平衡保护、缺相保护。

(1) 压缩机(预热器)过载保护。如果电流传感器检测的压缩机(预热器)三相工作电流中某相电流为PLC中设定的压缩机(预热器)电流值的1.5倍并持续1min,将对压缩机(预热器)进行过载保护,切断相应负载电源,触摸屏将显示相应压缩机(预热器)过载的故障信息并记录。

(2) 压缩机(预热器)过电流保护。如果检测到压缩机(预热器)某相电流为PLC中设定电流值的2.0倍并持续2s,将对压缩机(预热器)进行过电流保护,切断相应负载电源,触摸屏将显示相应压缩机(预热器)过电流的故障信息并记录。

(3) 压缩机(预热器)三相电流不平衡保护。当检测到压缩机三相电流值最大(或最小)值与平均值的偏差大于15%时,将在10s左右切断压缩机电源进行保护,触摸屏显示相应压缩机三相电流不平衡的故障信息并记录;当检测到空气预热器三相电流值最大(或最小)值与平均值的偏差大于20%时,触摸显示屏显示出相应空气预热器三相电流偏差的报警提示,但空气预热器仍可继续工作;当偏差大于等于30%时,将在10s内切断相应空气预热器电源进行保护,触摸显示屏显示出三相电流不平衡的故障信息并记录。

(4) 压缩机(空气预热器)缺相保护。当实时监测到压缩机(空气预热器)三相工作电流中某一相电流小于2A时,将在2~5s内切断压缩机(空气预热器)电源进行缺相保护,触摸显示屏显示出相应压缩机(空气预热器)某相缺相的故障信息并记录。压缩机(空气预热器)在启动时,启动电流较大且电流稳定时间较长(尤其是空气预热器),如果在机组启动时PLC将采集的工作电流与设定电流值进行比较判断会造成PLC误报警,则PLC在采集压缩机(空气预热器)工作电流进行故障判断时避开了启动电流这段时间。压缩机(空气预热器)启动时,延时3min左右再进行过载、过电流、三相电流不平衡故障判断。

3.3.1.8 联网通信功能

代理节点能实现车辆间的通信。各车的PLC通过代理节点将本车信息、发送给其他车的命令传送到列车总线上,供其他车调用。本车PLC可以通过代理节点读取列车总线上其他任一节车的信息;接收其他车发送给本车的命令并执行。

3.3.2 电气综合控制柜主要部件

3.3.2.1 PLC

PLC对整个电气系统进行控制,它可以实时监测电气系统运行过程中的参数并进行分析,对故障自动处理,通过显示触摸屏实现人机对话,响应显示触摸屏输入的命令、参数,将故障信息、运行记录通过显示触摸屏显示等。PLC的主要参数如下:

模拟量输入点	17点(0~10V)。
温度输入点	1点(PT100)。
开关量输入点	24点(直流24V,8mA)。
开关量输出点	24点(继电器输出)。

输出端最大开关能力 2A, 250VAC ($\cos\varphi=1$) 或 2A, 24V。

输出端最小开关能力 10mA, DC5V。

3.3.2.2 显示触摸屏

显示触摸屏是一种微型可编程终端, 采用全中文液晶显示触摸屏 (带背光), 具有字符类型和图像类型显示, 由通信接口和 PLC 的外设接口进行通信。主要功能是现场参数设定, 电源转换、空调机组等功能单元运行工况的人为控制, 运行工况参数的显示, 实时显示各功能单元的运行状态及实时报告故障现象。主要参数如下:

字符、图像类型显示 20×15 个汉字。

液晶显示器规格 320×240 点。

有效显示面积 122mm×92mm。

3.3.2.3 交、直流电源

(1) 主电路电源。主电路由 2 路电源母线中的其中一路提供电源, 向温水箱、逆变器、充电机供电, 并由逆变器转换成 AC380V、50Hz (非冬季模式) 或 AC220V、35Hz (冬季模式), 向车内空调、伴热等交流负载供电。其主要参数如下:

直流主电源: 额定工作电压 600V。

交流主电源: 非冬季模式为三相交流额定工作电压 380V; 冬季模式为三相交流额定工作电压 220V。

(2) 蓄电池电源。DC110V 电源全列贯通, 各车厢蓄电池及充电机通过隔离二极管与 DC110V 干线并联。蓄电池在充电机停止或故障时, 向本车照明、水位显示、塞拉门、车下电源箱控制、温水箱开水炉控制等负载供电。

电池欠电压保护动作值为 $93V \pm 1V$, 恢复值为 $97V \pm 1V$ 。

(3) 直流电源。应急灯、轴温报警器、防滑器、PLC 等重要负载由列车 DC110V 母线供电; 照明、车下电源箱、温水箱、开水炉、水位显示等负载的控制电源由本车 DC110V 电源提供; 控制柜内的 DC-DC 电源模块将 DC110V 电源转换成 DC24V 电源, 向 PLC、显示触摸屏、网关、安全用电记录仪供电; 转换成 DC12V 向传感器供电; DC110V-DC48V 电源将 DC110V 转换成 DC48V 电源向尾灯、电话插头供电。其主要参数如下:

直流电器控制电源: 额定工作电压为 DC110V, 电压波动范围为 DC77~137.5V。

PLC、触摸屏电源: 额定工作电压为 DC24V, 电压波动范围 DC20.4~26.4V。

信号采集电路 (传感器) 电源: 额定工作电压 DC12V。

传感器输出信号电压范围: DC0~10V, DC0~5V。

PLC、触摸屏及传感器供电 DC-DC 电源:

额定输入电压 DC 110V。

输入电压波动范围 DC 77~137.5V。

额定输出电压 DC (24 ± 1.2) V, DC (12 ± 0.6) V。

额定输出电流 DC24V 时 $\geq 3A$, DC12V 时 $\geq 1A$ 。

电压调整率 $\leq 1\%$ 。

电流调整率 $\leq 1\%$ 。

输出电压纹波峰-谷值 (VP-P) $\leq 1.0V$ 。

变换效率 $> 80\%$ 。

尾灯、电话插座供电 DC/DC 电源:

额定输入电压 DC 110V。

输入电压波动范围 DC 77~135V。

额定输出电压 DC (48 ± 2.4) V。

额定输出电流 $\leq 1A$ 。

电压调整率 $\leq 1\%$ 。

电流调整率 $\leq 1\%$ 。

输出电压纹波峰-谷值 (VP-P) $\leq 1.0V$ 。

变换效率 $\leq 80\%$ 。

3.3.2.4 WG 型网关

WG 型网关用于铁路客车 TKDD-1T1、TKDD-1T2 型配电柜。其中 PLC 为 WG-II 型, 轴温、防滑器网关为 WG-I 型。该网关一方面通过各种通信接口实现 PLC 到安全记录仪之间、轴温报警器到 PLC 之间、防滑器到 PLC 之间的数据传递; 另一方面通过 LonWorks 接口及列车总线实现车辆间的信息和命令传递。

3.3.2.5 DL-II 代理节点

代理节点是连接列车网和车厢网的桥梁, 有 2 个独立的 Lonworks 通信接口。上行 LonWorks 通信接口负责列车级网络通信, 接收列车主机的信息, 并将信息转发给下行 Lonworks 通信模块。下行 LonWorks 通信接口负责车辆级网络通信, 转发集中控制命令, 接收车辆级各应用节点传输的参数、工作状态等信息。

3.4 蓄电池组

一般, 铁路客车车辆上会配备一定容量的蓄电池组作为后备电源。当列车供电因某种原因无法正常供给时, 蓄电池为车上的紧急负载如控制系统、应急照明、紧急通风、列车通信、广播等提供电源。

3.4.1 主要类型

各电池厂家针对铁路应用开发的客车用蓄电池, 大致分为酸性和碱性两类。

3.4.1.1 酸性蓄电池

酸性蓄电池一般指铅酸蓄电池, 其负极为铅, 正极为二氧化铅, 电解质为硫酸。多数为开口或防酸式, 少量为胶体电解质。目前在客车上应用较少。其优点是化学能和电能转换效率较高、端电压高、容量大 (高达 $3000A \cdot h$)、价格低廉, 同时还具备防酸、防爆、消氢、耐腐蚀的性能; 缺点是比能量低、充放电倍率不高、低温性能较差。但随着新工艺、新技术的采用, 铅酸蓄电池的使用寿命也在不断提高。

3.4.1.2 碱性蓄电池

碱性蓄电池指以苛性钾或苛性钠的水溶液为电解液的蓄电池。主要应用为镉镍蓄电池, 其负极为镉或镉铁混合物, 正极为氧化镍, 电解质为氢氧化钾水溶液。与铅酸蓄电池相比, 具有比能量高、体积小、荷电能力强、可深度放电、充放电倍率高、温度适应性较好 [$(-40 \sim +55)^{\circ}C$]、维护简单等优点; 缺点是单体端电压较低、造价高、污染环境。

3.4.2 铁路客车车辆蓄电池充电方式

3.4.2.1 均浮充控制

为了延长蓄电池的使用寿命, 必须了解不同充电方式的特点和要求, 严格按照要求对蓄电池进行充电。铁路客车用蓄电池的充电方式采用的是限流恒压浮充电模式。

一般, 当蓄电池组投入使用的日期距出厂日期时间较长, 电池经过长期的自放电, 容量必然大量损失, 并且由于单体电池自放电大小的差异, 致使电池的密度、端电压等出现不均衡, 在投入使用前应对电池进行一次均衡充电, 否则, 个别电池会进一步发展成落后电池并会导致整组电池不可用。同样, 如果蓄电池长期不投入使用, 闲置时间超过 3 个月后, 应该对电池进行一次均衡充电。

在浮充状态下, 充电电流除维持电池的自放电以外, 还维持电池内的氧循环。但是, 浮充状态下充电电流又与电池

的浮充电压密切相关。因此，为了使蓄电池有较长的使用寿命，在电池使用过程中，要充分结合电池制造的原材料及结构特点和环境温度等几方面的情况，设定浮充电压。浮充电压设置过低，电池长期处于欠充电状态，会在活性物质和板栅之间形成高电阻阻挡层，使电池的内阻增加、容量下降；浮充电压设置过高，电池长期处于过充电状态，使电池负极析出的 H_2 和正极析出的 O_2 难以全部再化合成 H_2O ，造成电池失水，板栅腐蚀加速，使用寿命提前终止。因此，在蓄电池的使用和维护管理过程中，应根据电池厂家提供的资料进行浮充电压设置。如电池厂家推荐的单体电池浮充电压为 1.44V，此时应设置充电机的浮充电压为 115.2V(1.44×80)。

3.4.2.2 温度补偿

在铁路客车上，蓄电池一般安装在车底，环境温度变化较大，这对电池内部的化学反应速度有很大的影响。通常，电池静置时要求环境温度为 $0 \sim 40^{\circ}C$ ，温度太高会使电池的自放电加剧；而电池在使用时对环境温度的要求更苛刻，通常要求为 $20 \sim 25^{\circ}C$ 。在这种条件下，电池性能最佳，寿命最长。低温会使电池内阻增大，容量降低，充电接收能力下降，充放电循环寿命下降。当电池不是工作在电池厂家推荐的最佳温度下时，电池的充电电压应进行调整。温度越高，充电电压越低，称为“温度补偿”。充电机应自动根据蓄电池的温度来对充电电压进行调整，电压调整值为

$$\Delta V = - \text{温度补偿系数} \times (\text{蓄电池温度} - \text{基准温度}) \times N$$

(2.4-3)

式中：基准温度通常选 $20^{\circ}C$ 或 $25^{\circ}C$ ； N 为电池组内电池节数；DC600V 供电之 DC110V 蓄电池组通常为 78（部分车为 80）。

仅 DC600V 供电车之蓄电池充电采用温度补偿。
由于各蓄电池厂家采用的工艺和材料不同，实际应用中的温度补偿系数应根据蓄电池厂家给出的数据进行调整。温度补偿系数的单位为 $mV/^{\circ}C$ 。

温度补偿功能是为了将温度对电池的影响减至最小，但绝不是说有了对充电电压的温度补偿，电池就可以在任意环境温度下使用。温度低时，由于浮充电压增大，同样会引起浮充电流增大等一系列的问题；而温度高时，浮充电压减小，也会形成电池充电不足、隔膜损坏加速等一系列问题。

3.4.3 铁路客车常用的蓄电池规格及主要技术参数

3.4.3.1 22B 型客车蓄电池

22B 型铁路客车主要采用 DC48V 直流供电系统。DC48V 直流供电系统客车的蓄电池组电压为 DC48V，供电正常时，充电整流装置向蓄电池组充电；当发电装置停电或故障断电时，DC48V 蓄电池放电，向车上负载供电。常用蓄电池有酸性铅蓄电池 TG-450 和碱性镉镍电池 GN-300。铅酸蓄电池成本较低、单位重量较小，但使用稀硫酸作为电解液易腐蚀电池池箱，造成车体漏电；碱性镉镍电池使用寿命长、结构牢固、耐高温及大电流充电，但成本较高，且镉会造成环境污染和工业中毒问题。

(1) 酸性铅蓄电池 TG-450。电池容量为 450Ah，24 只电池串联成 48V，是以稀硫酸作为电解液的电池。蓄电池标称电压为 12V，蓄电池组的标称电压为 $12V \times n$ (n 为串联电池只数)。主要技术参数见表 2.4-7。

蓄电池使用时应注意：蓄电池充电终期，充电电流不宜过大，否则产生强烈气泡，造成极板上的作用物质脱落，影响蓄电池的寿命；蓄电池补充水时，应补添纯净的水，不能随意添加补充其他天然水，以防危害电池；应用和维修保养工作中有氢气产生和硫酸污水，要注意使用防护品，防止铅

中毒。

(2) GN-300 镉镍电池蓄电池。电池容量为 300Ah，每车装有 38 节 GN-300 型袋式镉镍蓄电池。蓄电池标称电压为 1.20V，蓄电池组的标称电压为 $1.20V \times n$ (n 为串联电池只数)。主要技术参数见表 2.4-8。

要注意蓄电池使用和维护。使用前要作外观检查和电压测量，有破裂、漏液应挑出，电压低于 0.5V/只时应注入少量电解液。使用前，需将气塞拧掉灌入电解液；调整液面，使液面高出极板 50~60mm。装车前以 0.1~0.2 C_5 A 恒流充电，使其充入的电量为蓄电池额定容量的 160%时停止充电，静置 2h 后，拧上气塞（阀）并用棉纱将蓄电池外表面擦干净，待装车使用。镉镍蓄电池使用的苛性碱能烧损皮肤和眼睛，操作人员应戴手套和眼镜，禁止明火和焚烧。蓄电池在正常使用情况下，应具有良好的免维护性，补水周期原则上不得短于 1 年。

3.4.3.2 25G、25T 型客车车用蓄电池

25G、25T 型铁路客车按电压制式不同分为 AC380V 交流供电系统和 DC600V 直流供电系统两种类型。25G AC380V 交流供电系统客车的蓄电池组电压一般为 DC48V。在交流 AC380V 供电正常时，充电整流装置向蓄电池组充电；当交流停电或故障断电时，DC48V 蓄电池放电，向车上重要负载及应急照明供电。25G DC600V 直流供电系统客车和 25T 型客车的蓄电池组电压一般为 DC110V。在 AC380V 或 DC600V 供电正常时，充电机向蓄电池组充电；当 AC380V 或 DC600V 停电或故障断电时，DC110V 蓄电池放电，向车上重要负载及应急照明供电。

(1) AC380V 交流供电的 25G 型客车的 DC48V 蓄电池。蓄电池型号 6-GFM-60，电池容量为 60Ah，4 只电池串联成 48V，为固定型阀控密封式免维护铅酸蓄电池。蓄电池标称电压为 12V，蓄电池组的标称电压为 $12V \times n$ (n 为串联电池只数)。主要技术参数见表 2.4-7。

表 2.4-7 TG-450 型和 6-GFM-60 型蓄电池
主要技术参数

参 数	TG-450	6-GFM-60
额定容量(Ah)	450	60
标称电压(V)	12	12
放电性能		
20℃	20℃ 以 0.2 C_5 A 充电 7h10min 后	20℃ 以 0.2 C_5 A 充电 8h 后
恒流放电电流(A)	C_{10}	C_{10} C_5 C_1
放电终止电压(V)	1.75	10.8 10.0 9.6
最低放电容量(Ah)	45	60 50 36
-30℃	-30℃ 放电性能(在常温条件下, 0.2 C_5 A 充电后)	-30℃ 放电性能(在常温条件下, 0.1 C_5 A 充电后)
恒流放电电流(A)	C_{10}	C_{10}
放电终止电压(V)	1.75	10.8
最低放电容量(Ah)	25	30
自放电性能	在(20±5)℃ 环境中以 0.2 C_5 A 充电, 搁置 28 昼夜, 用 0.2 C_5 A 放电到终压, 容量损失率小于 30%	在(20±5)℃ 环境中以 0.1 C_5 A 充电, 搁置 28 昼夜, 用 0.1 C_5 A 放电到终压, 容量损失率小于 5%
寿命		
循环寿命(次)	>500	
浮充使用寿命(年)	>5	>5
带电解最大质量(kg)	29	23

(2) DC600V 直流供电的 25G 型客车和 25T 型客车的 DC110V 蓄电池。每车装有 80 节 GNZ120- (4) 型蓄电池。蓄电池标称电压为 1.20V，蓄电池组的标称电压为 $1.20V \times$

n (n 为串联电池只数)。主要技术参数见表 2.4-8。

蓄电池在正常使用情况下,应具有良好的免维护性,补水周期原则上不得短于 1 年。蓄电池组的检验符合 GB/T 15142—2002《方形开口镉镍单体蓄电池总规范》的规定。蓄电池组容量应不小于 120Ah (碱性中倍率),保证列车直流负载用电 (即电池组的放电电压不低于 77V) 时间不少于 3h;或紧急通风不少于 1h、应急照明不少于 3h。蓄电池组应有短路保护,各极对箱体间的绝缘电阻应不小于 20MΩ。

表 2.4-8 GN-300 型和 GNZ120- (4) 型蓄电池
主要技术参数

参数	GN-300	GNZ120-(4)
额定容量(Ah)	300	120
标称电压(V)	1.2	1.2
放电性能		
20℃	(20±5)℃环境中以 0.2C ₅ A 充电 8h 后	20℃以 0.2C ₅ A 充电 8h 后
恒流放电电流(A)	0.2C ₅	0.2C ₅ 1C ₅ 2C ₁
放电终止电压(V)	1.0	1.0 0.9 0.9
最低放电时间(min)	300	300 40 10
-18℃	-18℃放电性能 (在常温条件下,0.2C ₅ A 恒流充电 8h 再搁置 16~24h)	-18℃放电性能 (在常温条件下,0.2C ₅ A 充电 8h 后)
恒流放电电流(A)	0.2C ₅	0.2C ₅ 1C ₅
放电终止电压(V)	1.0	1.0 0.9
最低放电时间(min)	180	180 10
自放电性能	在(20±5)℃环境中以 0.2C ₅ A 充电,搁置 28 昼夜,用 0.2 C ₅ A 放电至 1.0V,其放电持续时间不小于 4h	在(20±5)℃环境中以 0.2C ₅ A 充电 8 h,搁置 28 昼夜,用 0.2 C ₅ A 放电到 1.0V,其持续时间不少于 4h
寿命		
循环寿命(次)	>1800	1800
浮充使用寿命(年)	>15	>15
带电解液最大质量(kg)	21.5	1.9

3.5 车端连接器

3.5.1 KC20A 型电力连接器

KC20A 型电力连接器,适用于铁路空调客车传送 AC380V 交流三相动力电源,也可供其他场合的电力连接使用。

KC20A 型电力连接器的结构主要由插头 (9),插座 (8) 和操动机构组成,插头与插座相应安装有 4 套自锁紧锥形接触对,每个插销 (5) 都可自由浮动,每个插套 (6) 都设置一圆柱压缩弹簧 (7),因此在插合时,能自动保证接触对准确稳定牢靠的连接。接触电阻极小,承载电流大、温升低;磨损小,寿命长;操作方便省力。经铁道部产品质量监督检验中心车辆检验站检验和装车运行试验,主要技术性能指标见 TB/T 2408—1993《铁道车辆用三相动力连接器》规定。

KC20A 型电力连接器是 KC20 电力连接器的改进型,增加了电缆夹持装置,采用了双弹簧挡圈结构,操作件、外露件改为不锈钢材料,提高了连接器的使用性能。由圆盘形橡胶护罩 (12) 和长、短波纹管形橡胶护套 (13)、(14) 组成的橡胶防护装置,可有效保护插座电极裸露部分在运行过程中免受污染。KC20A 型电力连接器结构如图 2.4-19 所示,主要技术参数见表 2.4-9。

3.5.2 KC20D 型电力连接器

KC20D 型电力连接器为 4 组接触对结构。主要用于铁路机车向客车传送 DC600V 直流电源,也可用于向空调客车传送交流 AC380V 三相动力电源,或用作其他场合的电力连接。

KC20D 型电力连接器主要由插头 (9),插座 (8) 和操

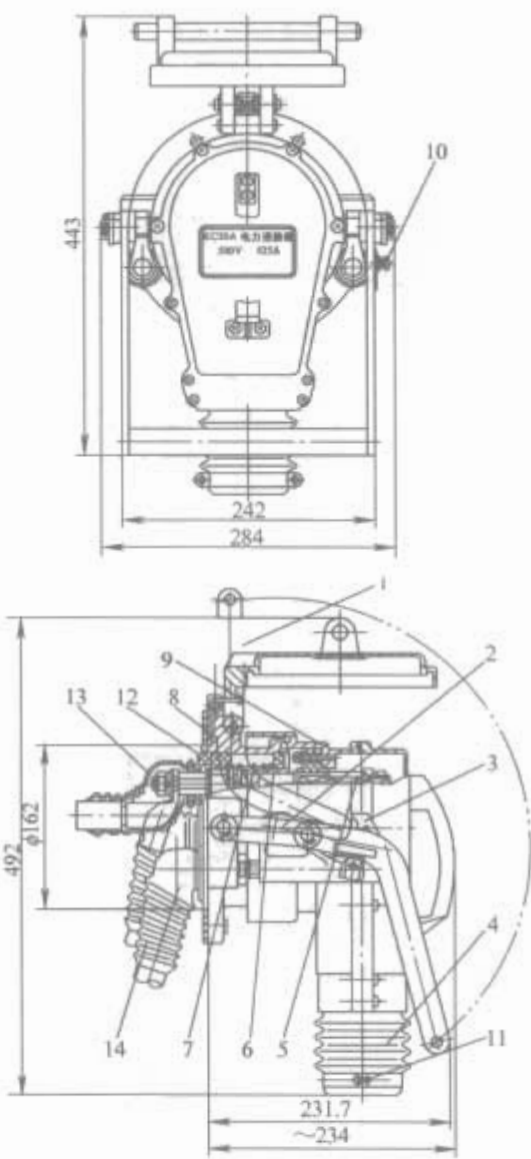


图 2.4-19 KC20A 型电力连接器结构简图

1—插座防护盖;2—摇臂;3—拉钩;4—橡胶防护套;5—插销插套;6—插套;7—圆柱压缩弹簧;8—插座;9—插头;10—保险钩;11—喉箍;12—圆盘形橡胶护罩;13—长波纹管形橡胶护套;14—短波纹管形橡胶护套

动机构组成,插头与插座相应安装有 4 套自锁紧锥形接触对,每个插销 (5) 都可自由浮动,每个插套 (6) 都设置一圆柱压缩弹簧 (7),因此在插合时能自动保证接触对准确稳定牢靠的连接。接触电阻极小,承载电流大,温升低;磨损小,寿命长;操作方便省力。经铁道部产品质量监督检验中心车辆检验站检验和装车运行试验,主要技术性能指标均能满足铁路客车直流供电的要求,并优于 TB/T 2408—1993《铁道车辆用三相动力连接器》的规定。

由圆盘形橡胶护罩 (12) 和长、短波纹管形橡胶护套 (13)、(14) 组成的橡胶防护装置,可有效保护插座电极裸露部分在运行过程中免受污染。KC20D 型电力连接器的安装尺寸和操作方式与 KC20 型连接器完全一致。KC20D 型电力连接器结构如图 2.4-20 所示,主要技术参数见表 2.4-9。

3.5.3 43 芯集控电连接器

43 芯集控电连接器主要适用于空调列车集中控制系统,也可用于其他电气设备。

43 芯集控电连接器接触对全部采用先进的双曲面线簧式结构,具有接触电阻小、导电性能好,插拔阻力小、动态环境中接触稳定可靠、抗冲击振动等优点。接触对全部采用镀金表面处理,具有良好的抗腐蚀性能。43 芯集控电连接器结构如图 2.4-21 所示,主要技术参数见表 2.4-9。

3.5.4 39 芯通信连接器

KTL39GX 型 (KTL39DX 型) 39 芯客车通信连接器用于铁路客车的监控、通信和闭路电视的电信号连接,还可用于

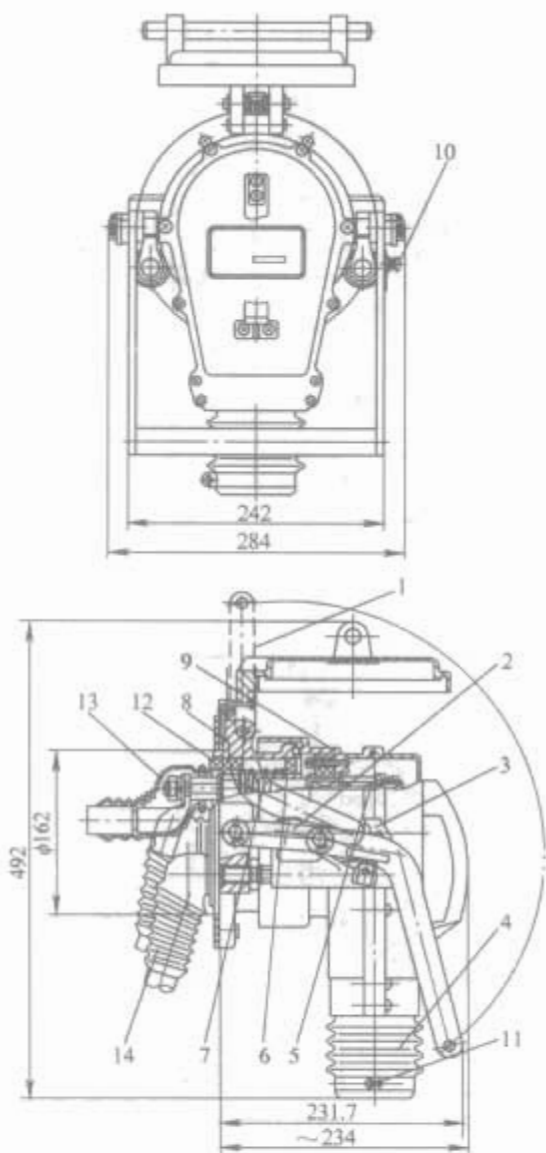


图 2.4-20 KC20D 型电力连接器结构简图
1—插座防护盖；2—摇臂；3—拉钩；4—橡胶防护套；5—插销插套；6—插套；7—圆柱压缩弹簧；8—插座；9—插头；10—保险钩；11—喉箍；12—圆盘形橡胶护罩；13—长波纹管形橡胶护套；14—短波纹管形橡胶护套

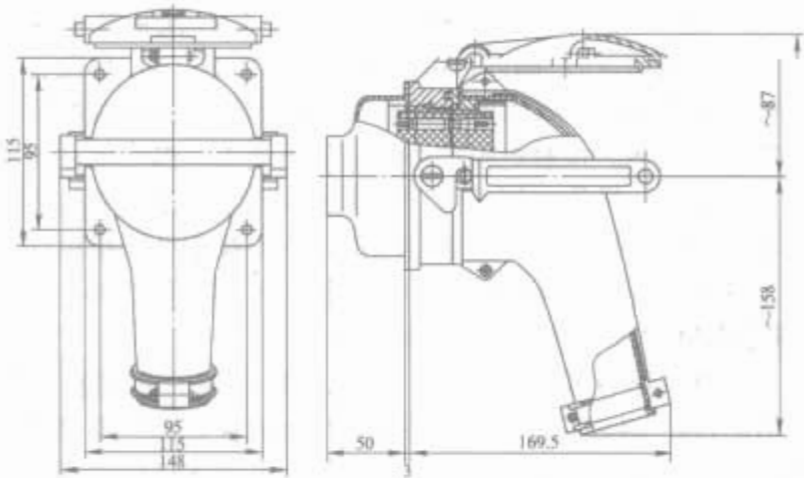


图 2.4-21 43 芯集控电连接器结构简图

其他场合的电器连接，是客车通信连接器系列化产品之一。

KTL39GX 型（KTL39DX 型）客车通信连接器由音频接触对 38 对和射频同轴接触对 1 对组成。音频接触对采用线簧孔结构，射频同轴接触对采用先进的高包容形式，两种接触对均具有接触电阻极小、导电性能好和在动态环境中仍能保证稳定接触的优点。该连接器有 39 个接触对，序号 1~19，21~39 是线簧孔接触对，序号 20 是射频同轴接触对。39 芯通信连接器结构如图 2.4-22 所示，主要技术参数见表 2.4-10。

3.5.5 DC110V 电力连接器

DC110V 电力连接器（SL21X）适用于铁路客车传送 2

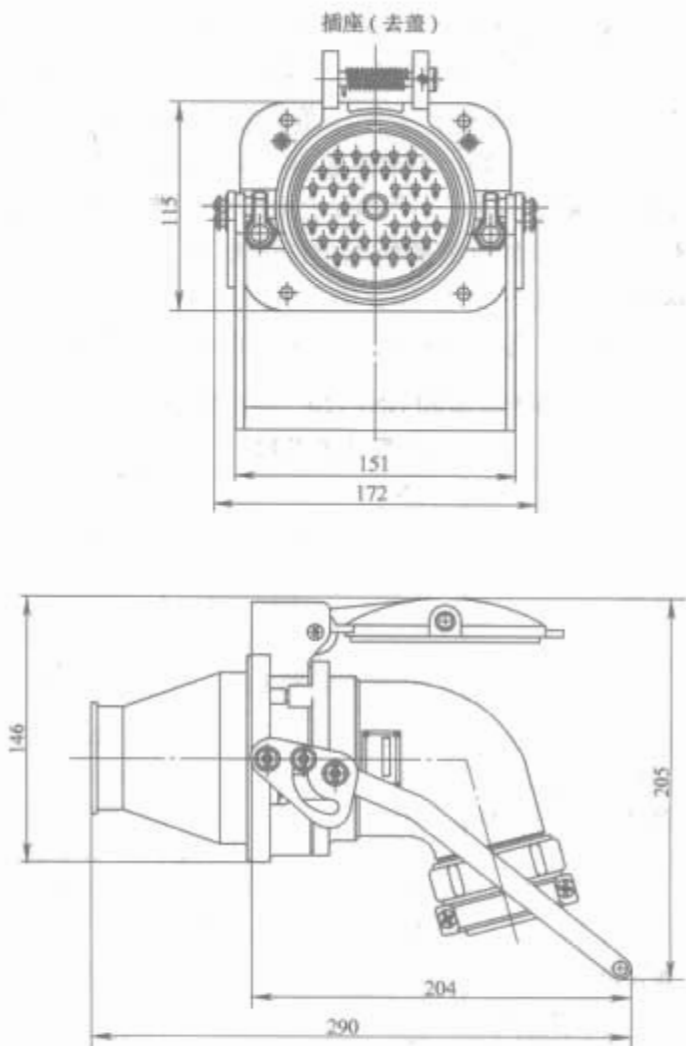


图 2.4-22 39 芯通信连接器结构简图
相动力电源，也可供其他场合的电力连接使用。

DC110V 电力连接器接触对结构采用开槽形式，具有接触电阻小、导电性能和防振动性能好的优点。DC110V 电力连接器结构如图 2.4-23 所示，主要技术参数见表 2.4-9。

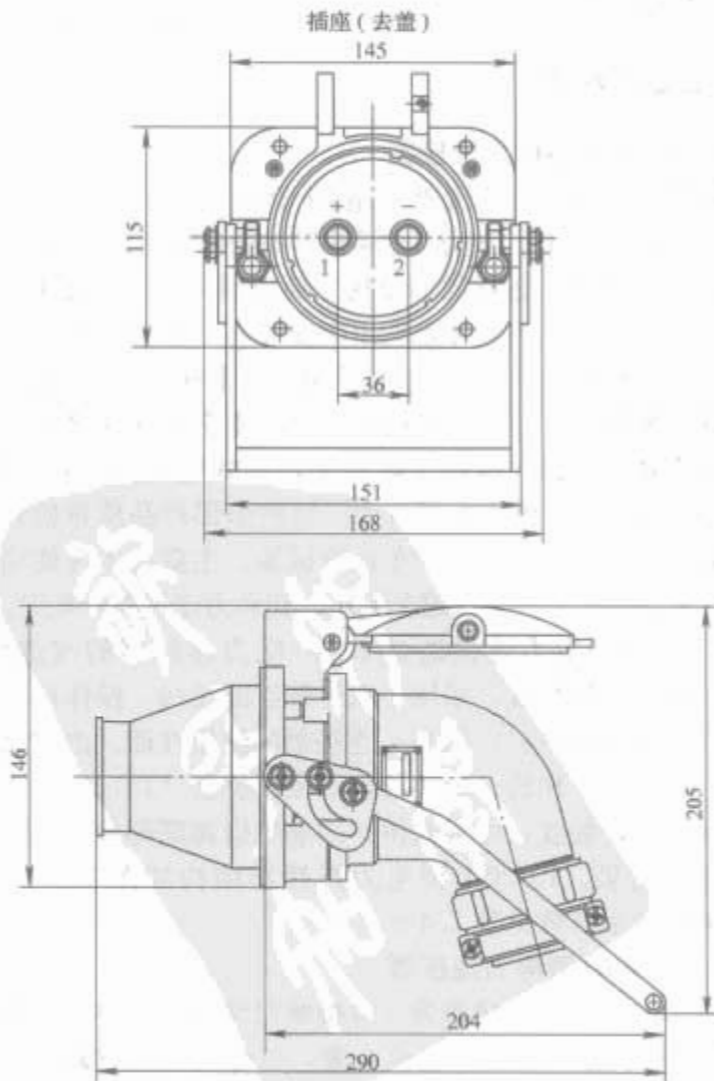


图 2.4-23 DC110V 电力连接器结构简图

3.5.6 其他电连接器

铁路客车常用的连接器还包括 SC20 型播音连接器（适用于列车间播音系统）、SC21 型电气连接器（适用于铁路客

车传送 DC48V 电源）、KTL15 通信连接器（适用于铁路空调车辆间通信线路的电气连接）、LDK-5 电控连接器（适用于铁路空调车辆电制动器的电气连接）等。

表 2.4-9 KC20A、KC20D、43 芯集控电连接器、DC110V 电力连接器连主要技术参数

参 数	KC20A	KC20D	43 芯集控电连接器	DC110V 力电连接器
额定电压 (V)	AC500	DC750	AC500	DC250
额定电流 (A)	425	670 (二芯并联)	φ2.5 接触对: 25 φ3.5 接触对: 40	130
接触电阻 (mΩ)	≤0.2	≤0.2	≤2	≤0.2
绝缘电阻 (MΩ) 正常条件下 湿热试验后	≥500 ≥2	≥800 ≥20	≥500 ≥20	≥1000 ≥100
耐压试验 电压 (V) 时间 (min) 频率 (Hz)	3000 1 50	3000V 1 50	2500 1 50	2500 1 50
温升 (K)	<60	<60	<60	<60
寿命 (次)	>1500	>5000	>500	>2000
环境温度 (℃)	-50~+50	-50~+50	-55~+70	-55~+70
相对湿度	+25℃ 时, 可达 95%	+25℃ 时, 可达 95%	(+40±2)℃ 时, 达 95%	(+40±2)℃ 时, 可达 95%

表 2.4-10 39 芯通信连接器技术性能及参数

参 数	指 标
线簧孔接触对	
额定电压 (V)	AC500
额定电流 (A)	15
耐压试验	
电压 (V)	2500
时间 (min)	1
频率 (Hz)	50
接触电阻 (mΩ)	≤5
绝缘电阻 (MΩ)	
正常条件下	≥1000
湿热试验后	≥50
寿命 (次)	>2000
射频同轴接触对	
额定电压 (V)	AC500
标称特性阻抗 (Ω)	75
电压驻波比	<1.3
最高使用频率 (MHz)	100
环境温度 (℃)	-55~+70
相对湿度	+40±2℃ 时, 达 95%
振动	
振频 (Hz)	1~50
振幅 (mm)	0.75
碰撞	
次数 (次/min)	10~60
加速度 (m/s ²)	100

3.6 客车网络监控系统

3.6.1 系统构成

25T 型空调客车列车监控系统能够自动监测车辆的各种参数, 以确保设备和车辆运行安全。列车监控系统由位于各个车厢的综合控制柜、智能节点和位于随车工程师办公席的主控站以及通信网线组成。综合控制柜主要由供电控制、空调控制、防滑器、轴温报警器等组成。智能节点主要有烟火报警器、车门控制器、逆变器、充电机等部件。监控网络主要由与相应控制器相连的网关组成, 如图 2.4-24 所示。

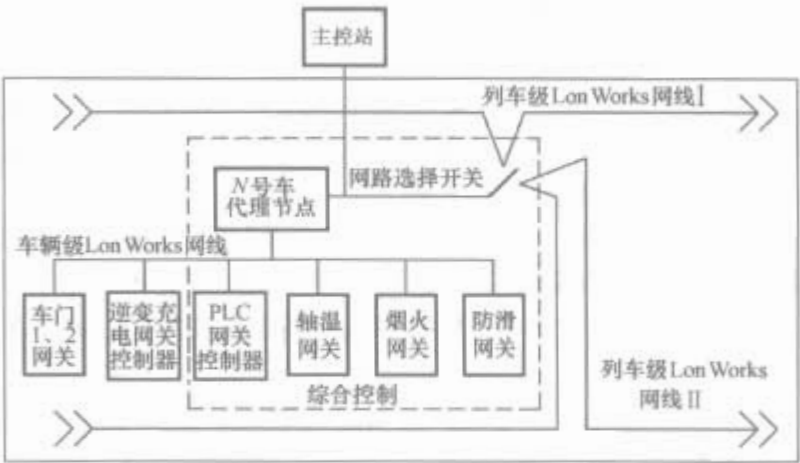


图 2.4-24 客车网络监控系统构成框图

25T 型客车采用 LonWorks 网络技术, 实现全列车的无主式监测和控制。技术上适应了网络监控技术的发展, 在运用上考虑新的运行机制下, 列车乘务人员在任何一个车内, 都能对全列其他车的供电和空调进行控制, 也能监测到其他车的轴温、防滑、烟火、车门和车下电源的运行参数。

车辆级网络实现对本车的供电系统、空调控制、轴温报警器信息、防滑器信息、车门状态信息、逆变器 (DC600V 车) 和充电机的集中监控。控制核心为 PLC。车辆的运行参数和故障诊断信息显示在触摸屏上。

列车级网络实现车对车的无主式集中监控, 即在任何一辆客车上均可对其他车辆的供电系统和空调系统进行控制, 可以查阅其他车辆的轴温、防滑、逆变器充电机、车门状态和故障诊断等信息。

3.6.2 系统功能

3.6.2.1 触摸屏

触摸屏是人机接口, 其主要功能包括显示本车各设备的主要工作状态和工作参数、行车里程、车号等; 对本车供电和空调工况进行控制; 全列监控。可查询他车各设备的主要工作状态和工作参数, 对他车供电和空调进行远距离控制。

3.6.2.2 PLC

PLC 负责本车供电和空调设备的控制和接受网络信息执行网络控制命令; 检测本车电流、电压、温度等参数; 实

施过电压、过电流等故障保护。

3.6.2.3 代理节点

DL-II 代理节点负责车辆级 LonWorks 网信息的整理以及列车级和车辆级 LonWorks 网信息的传递, 供触摸屏进行显示, 相当于车辆的信息“调度员”。

3.6.2.4 WG-II 网关

车辆级 LonWorks 网上的各个网关均由“WG-II 网关”构成, 但接口形式和软件配置各不相同。每个网关相当于一个翻译, 将不同设备的信息编辑成统一的语言送到车辆级 LonWorks 上以共享。各个网关的连接的对象、功能及接口方式见表 2.4-11。

表 2.4-11 各网关连接对象、功能及接口方式

名称	功 能	配套设备
PLC 网关	负责将供电、空调系统的状态和参数传递到网络上	PLC
防滑器网关	负责将防滑状态、故障信息、速度、里程等传递到网络上	防滑器
轴温报警器网关	负责将车辆轴温数据传送到网络上	轴温报警器
车门网关	负责将车门状态、故障信息传送到网络上	车门控制器
烟火网关	负责将烟火报警器及传感器的状态信息传送到网络上	烟火报警器
充电机逆变器网关	负责将逆变器及充电机的状态、参数、故障信息传送到网络上	充电机/逆变器

3.6.3 监控内容

- (1) 供电系统。监测车辆供电回路、供电电压、供电电流、供电故障、漏电流、母线电压、电池电压及充、放电流, 控制车厢的供电转换和停止。
- (2) 空调系统。监测车辆温度、空调运行参数、空调机组的运行状态、故障状态, 控制车厢空调的运行和停止, 能诊断和报告制冷故障、制暖故障、冷凝风机故障、通风机故障。
- (3) 逆变器及充电机。监测运行状态、主要输出参数、故障状态。
- (4) 监测每节车的轴温信息及状态、防滑信息及状态。
- (5) 车门。监测前后两个车门的门状态信息及故障, 诊断、报告车门未关闭到位、未锁闭、98%开关故障、锁闭机构故障、开门故障、供气压力低于 0.45MPa、防挤压压力开关故障、外操作开关故障、内紧急锁被操作、内操作开关未复位、集控开门信号故障、隔离锁故障、5km/h 速度信号故障。
- (6) 烟火报警。监测每车烟火报警器的状态、传感器的状态信息。

3.6.4 电气监控系统主控站与数据无线传输

25T 型客车具有网络监控功能, 通过列车级监控系统可以实时查询全列所有客车的供电系统、空调系统、车下电源、防滑器、轴温报警器、车门系统、烟火报警器等系统的状态和信息, 并能对全列进行电源转换控制、空调机组控制。监控系统主控站具有运行数据记录功能; 运行数据记录在监控主机的存储卡中, 存储卡中数据可以通过计算机应用软件读出, 并形成数据库保存在计算机中。

监控系统由监控主机和主机网关组成。主机网关收集全列客车信息并传送给监控主机, 监控主机将信息进行翻译后在界面上显示并记录在存储卡中。

- (1) 主控站功能。系统参数设定, 查

看列车概况, 查看单车详细信息, 查看全列分类详细信息, 发送控制命令, 记录运行数据, 更改系统日期、时间, 记录供电电源的运行状况。

- (2) 地面数据读取。主控站主机数据存储卡为 32MB, 每分钟记录一次列车监控系统数据, 可存储一个星期的列车运行数据。存储卡取出后可到地面计算机上通过读卡器和专用软件, 将运行数据释放到地面计算机中, 并自动形成运行参数数据库, 供维护和故障诊断参考。

- (3) 数据无线传输装置。25T 型客车在主控站内安装了运行信息无线传输装置。无线传输装置将列车运行的主要信息通过无线的方式发送到地面监测中心的网站上, 用户可以通过登录网站的方式, 即时查看列车运行信息。25T 型客车无线传输装置为 WX-II 型。

WX-II 型无线传输装置综合了 LonWorks 列车网络技术、卫星定位系统技术 (GPS)、通用分组无线业务 (General Packet Radio Service, 简称 GPRS) 技术、地理信息系统 (GIS) 和计算机网络通信技术, 构成了通信与定位相结合的监控报警系统。

- 1) 数据发送端。该装置用 2 根网线连在 LonWorks 列车网上, 通过列车网收集全列的供电、空调、防滑、轴温报警、烟火、车下电源、车门等信息, 通过 GPS 技术收集经度、纬度、计算运行速度、记录当前时间等信息。
- 2) 通信链路。数据经由无线智能传输产品走 GPRS 网络到达移动 SGSN 骨干网, 从 GGSN 到移动 ROUTER 采用 GRE TUNNEL 连接, 从移动 ROUTER 到监控中心 ROUTER 使用专线方式连接。
- 3) 数据接收端。监控中心 ROUTER 直接接入 SWITCH, 通过 GRE TUNNEL 方式将数据直接传送给 ARS, 然后由 ARS 将数据转发给相应的后台数据库和应用程序。
- 4) 地面接收。系统投入运用后, 用户可登录网站, 根据提供的账号和密码查询用户管理权限范围内的车辆, 查看运行的当前信息和历史信息, 并可将其下载。用户可在网站上动态查询车上的电源工作电压、总电流、漏电流、室内温度、电池电压、整流电压、充放电流、空调工况、供电信息、运行里程、地理位置、防滑器、轴温报警器、塞拉门、烟火报警器等的工作状态信息, 根据 GPS 定位信息, 可以直观地查看车辆运行在线路上的位置和运行区间。

无线传输系统网络拓扑结构如图 2.4-25 所示。

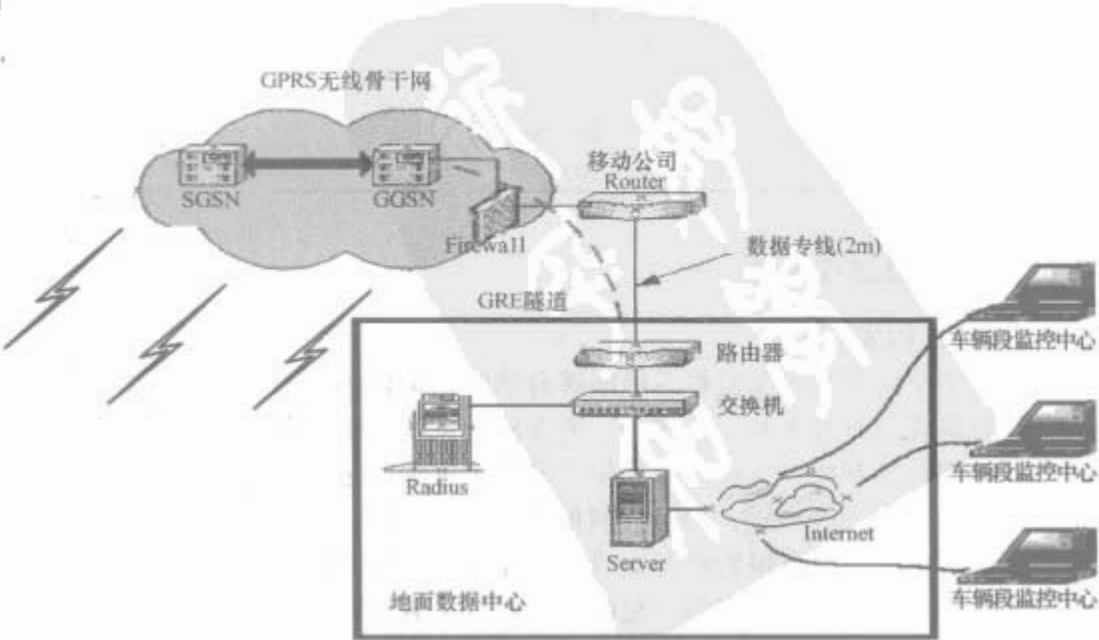


图 2.4-25 无线传输系统网络拓扑结构图

3.7 旅客信息系统和设备

3.7.1 旅客列车信息显示系统

3.7.1.1 系统的组成

旅客列车信息显示系统由主控站、顺号调节器、LED 信息显示屏、数据通信线路等构成。整个系统以主控站为中心，顺号调节器为节点，显示屏为控制对象（见图 2.4-26）。该系统不仅解决了系统的编址问题，而且能使系统的通信负荷降至最低。此外，系统还具有较强的可扩充性，其他输入输出设备只要符合本系统的通信协议，均可挂接。

系统通信采用 RS485 总线标准，最大传输距离可达 1.2km。该总线不仅可以传输显示屏信息，还可与其他输入输出设备联网通信。列车在实际使用过程中，经常更换车辆编组，使信息显示原编址受到影响，影响系统正常使用。为了解决这个问题，需用顺号调节器控制显示屏的物理编址，建立车厢中显示屏编址的目录，而车厢中的显示屏以 8 位（即一字节）编址。显示屏编址的高 4 位代表类型，低 4 位代表机号。

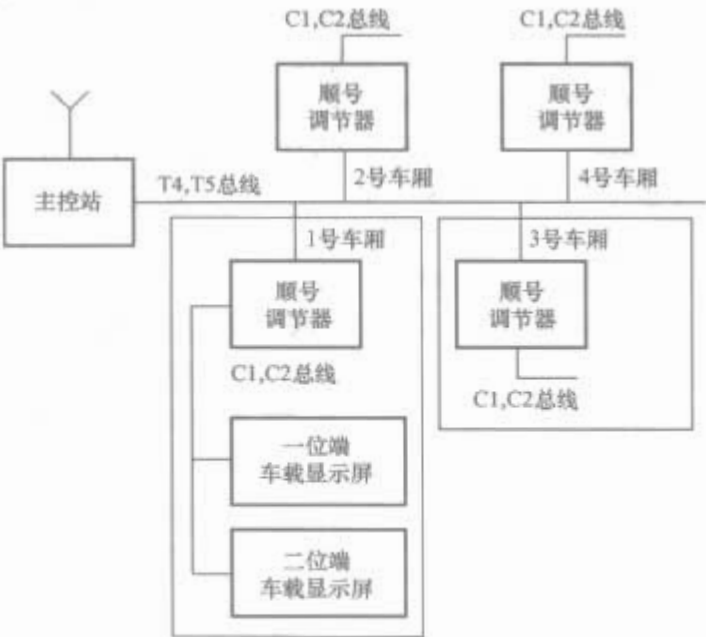


图 2.4-26 旅客列车信息显示系统

系统中的通信对象以顺号调节器为主体单元，车中的所有输入和输出设备都可以经由顺号调节器与主控站通信。主控站和顺号调节器共同构成网络的分布式控制，使系统集散性好、通信可靠、性能稳定、总线负载轻、分布合理、维护方便。

3.7.1.2 系统的工作原理

旅客列车信息显示系统主控站通过安装在列车顶部的 GPS 天线接收卫星发送的数据，然后由主控站进行处理，与事先存储在存储器内的列车运行信息进行比较，生成列车运行时的动态的公共信息。这些公共信息包括：当前时间、日期和星期，前方到达车站名，准点时间和停留时间，列车运行速度，车厢外温度，列车运行状态（包括晚点信息和临时停车信息）。

公共信息一方面在主控站的液晶显示器屏幕上显示，以便让广播员掌握列车运行状况。另一方面主控站通过总线扩展板上的 RS485 接口把这些信息发往专用通信电缆，将信息传递到配在各车两端的显示屏，由显示屏上的 RS485 串行接口将信息接收，并由 LED 点阵块显示，以便让旅客即时掌握列车运行状况及到站信息。除了发送公共信息外，主控站还定时发送其他一些固定信息，如列车编组情况、运行线路和车次等信息，充分满足旅客对这方面信息的需求。

显示屏除了显示主控制器发来的流动信息外，还具有车

号、禁烟、厕所无人等固定信息的显示。旅客们无论白天、晚上都能从旅客列车信息显示系统得到相关的信息，方便了旅行生活。

3.7.1.3 系统设备

系统设备包括主控站、信息显示屏及附件和顺号调节器。

3.7.2 车载影视系统

车载影视系统采用 550MHz 带宽、邻频、单向传输技术，使用专用的有线电视设备，构成一个高性能的电视图像信号传输系统。在客车的某一车辆建立一个前端系统，并经过前端设备处理后，通过车辆与车辆间的网络进行传输。车载影视系统基本原理和信号传输过程如图 2.4-27 所示。

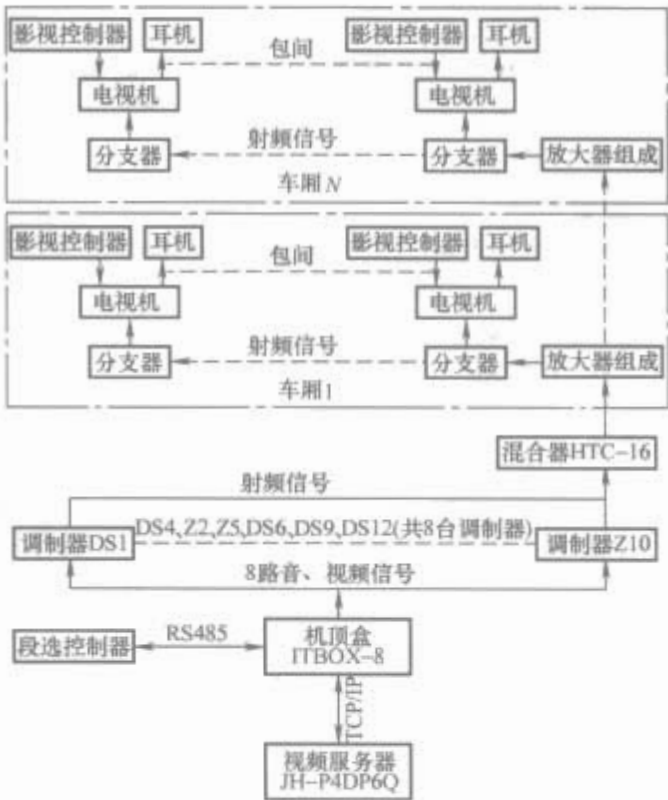


图 2.4-27 车载影视系统基本原理和信号传输过程

3.7.2.1 系统原理

系统前端的节目源采用视频服务器和机顶盒方式，完成视频信号的采集、压缩和解压的工作；机顶盒输出的 8 套视、音频信号经 8 台邻频调制器调制为射频信号并经混合后送入系统；调制器按隔频方式设置频道输出。

每节客车车厢配置 1 台放大器、1 只切换开关 BRTC-1（安装于放大器的内部）。放大器输出既要满足本节车厢各终端的信号电平要求，又要满足补偿 2 节车辆之间传输损耗的要求。切换开关主要实现每节客车车辆信号的双向传输和解决系统冗余等功能。每节客车车厢采用 9 个不同分支损耗的四分支器串接方式完成信号从放大器到终端的信号传输。

系统传输干线均采用 RG11 四屏蔽射频电缆，从用户分支器到液晶电视的连接线采用 RG6 四屏蔽射频电缆。该系统采用视频服务器作为信号节目源，通过机顶盒解码，经调制器和混合器混合成一路射频信号，由同轴电缆传输至各个车辆。每个车辆加干线放大器，补偿由于车辆连接和电缆传输引起的电平损耗。由分支器、分配器组成的分支-分配网络将射频信号传输到每个包间的电视机。这样，乘客就可以通过控制面板来选择频道观看自己喜爱的影视节目。

3.7.2.2 系统基本功能和特点

- (1) 乘客可以通过影视控制器自行选择观看 8 套影视节目。
- (2) 乘客可以通过影视控制器自行调节耳机音量。

(3) 当不需要观看节目时,乘客也可以通过影视控制器将电视关闭,而不影响其他乘客观看。

(4) 系统可以按频道分类(如1频道为体育、2频道为影视、3频道为戏曲等)。

(5) 系统可满足列车的任意编组形式。重新编组后,不必重新调整设备参数,只要操作相关设备上的开关。

(6) 系统采用了双信号源备份。当一信号源发生故障时,可以开启另一信号源使用。

(7) 系统还采用了双干线的冗余方式。系统会自动检测干线故障,当一路干线发生故障时,系统自动切换至另一路干线;并且故障指示灯亮。

(8) 系统有较强的扩展性。只要在系统前端加入一卫星接收装置,传输干线和用户终端无需增加和改变,就可在用户终端收看卫星电视节目。

3.7.3 播音系统

播音系统由播音配电盘、播音主机、扬声器和播音天线等组成,如图 2.4-28 所示。

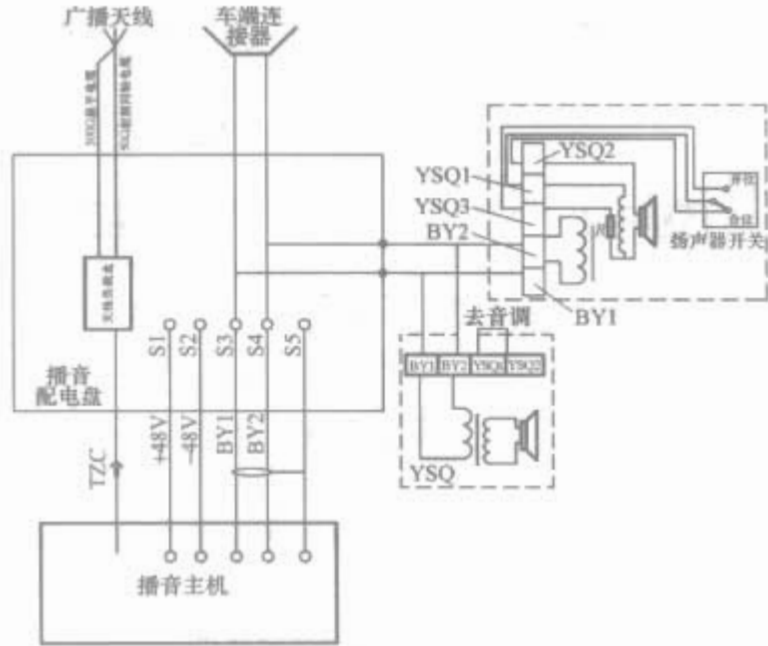


图 2.4-28 播音系统

播音配电盘设置在播音车的播音室内,可以为播音主机提供 DC48V 电源。播音主机输出的播音信号通过播音配电盘与连接器的连接输送到所连挂的车辆。播音天线采用 TL-GF-3 型列车广播天线,这是一种具有高压防护能力的新型广播天线,属于谐振式天线,可以接受中波、短波频率的信号。吸顶扬声器是一种新型扬声器,外壳材质采用 LG ABS747,装饰面板材料采用铝网喷塑,具有安装方便、外形美观、结构紧凑、音质清晰等特点。

3.8 安全监控设备

3.8.1 客车行车安全监测诊断系统

客车行车安全监测诊断系统由 3 个分系统组成,即车载安全监测诊断系统、无线通信系统和地面数据管理与专家系统。目前 25T 型车和行邮车上只安装车载安全监测诊断系统。

车载安全监测诊断系统为 2 级层次网络结构的 LonWorks 列车通信网络系统。由连接同一列车上不同车辆的列车网络(列车总线)和连接同一车内不同功能级监测诊断子系统的车辆网(车辆总线)所组成。

车辆总线上的各功能级监测诊断子系统由车辆网关进行

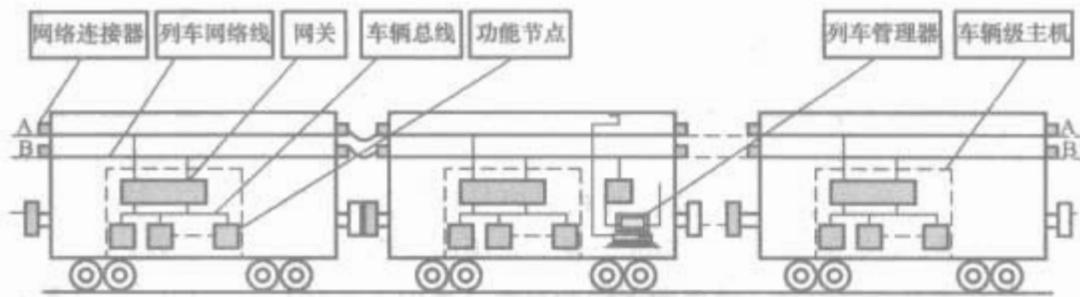


图 2.4-29 车载安全监测诊断系统网络

通信管理,如图 2.4-29 所示。它既是车辆网络通信管理器,又是列车网与车辆网的网关。

列车总线上的列车网络管理器根据各车辆的监测诊断报告再进行全列车综合诊断,得出本列车各车辆的监测诊断报告(集中显示和报警)。列车网络管理器还担负组网(网络初运行),以适应车辆编组变动时各车辆的车号、车厢号、运行方向的识别任务。

系统分为功能级和列车级 2 级监测诊断。对于列车级监测诊断系统来说,车辆级功能监测诊断子系统是基本监测诊断单元。各车辆是相同的,物理上是独立的。车厢里的各功能级监测诊断子系统则只担负本车某一部件或功能的监测和诊断(如制动系统监测诊断子系统的任务是监测诊断制动系统的工作状态)。车辆级不能诊断或诊断条件不充分的,通过列车级综合诊断来实现(如关门车、折角塞门关闭、转向架状态等)。

3.8.1.1 车辆级网络系统

车辆级网络系统由 4 个功能级监测诊断子系统,一个显示节点和车辆网关通过 LonWorks 车辆总线组成。各功能级子系统的诊断报告和过程数据通过车辆网关和列车总线传送给列车级主机(列车网络管理器),如图 2.4-30 所示。

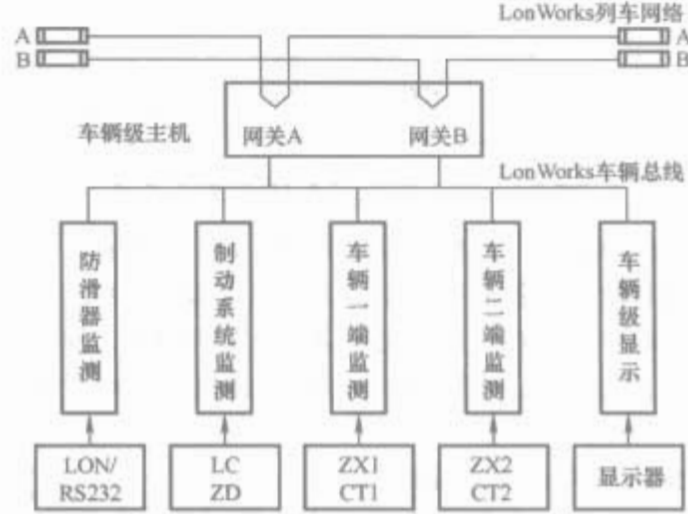


图 2.4-30 车辆级主机监测诊断功能示意图

车辆级网络系统将防滑器的车辆参考速度变量传送给车门监测节点和车辆转向架状态监测节点,作为两节点的诊断条件;将基础制动监测节点监测的制动/缓解工况变量提供给车辆监测节点、防滑器监测节点,作为诊断输入条件;将防滑器、制动节点的有关变量传送给车辆节点,参与系统诊断。

3.8.1.2 车辆级主机及各功能模块

(1) 车辆级主机。车辆级各监测诊断子系统集中安装在一台 6U 机箱内,机箱内每一个板卡担负某一个独立功能。它通过机箱下面的端子排与外围设备、列车网和传感器连接。

(2) 车辆制动监测诊断子系统。25T 型提速客车的制动系统是空气制动系统。该子系统监测列车支管和制动管路的风压,诊断制动机的制动/缓解工况,报告有无制动、缓解

作用不良、自然制动和自然缓解故障；并为列车级综合诊断是否有折角塞门关闭、关门车事件的发生提供诊断数据；在列车级主机全程记录、存储诊断事件报告、列车管和制动管路风压的过程数据。下载到地面数据库专家系统的过程数据与报告可实现查询、比较、再次诊断和故障确认。在车辆级为防滑器、车辆转向架状态监测诊断子系统提供制动、缓解状态报告。测点安装布置如图 2.4-31 所示。图中，LC 为列车管压力监测传感器，必须安装在列车支管截断塞门后面的气路上。ZD 为制动管压力监测传感器，必须安装在空重车阀和车辆缓解塞门后面靠近制动缸的气路上。

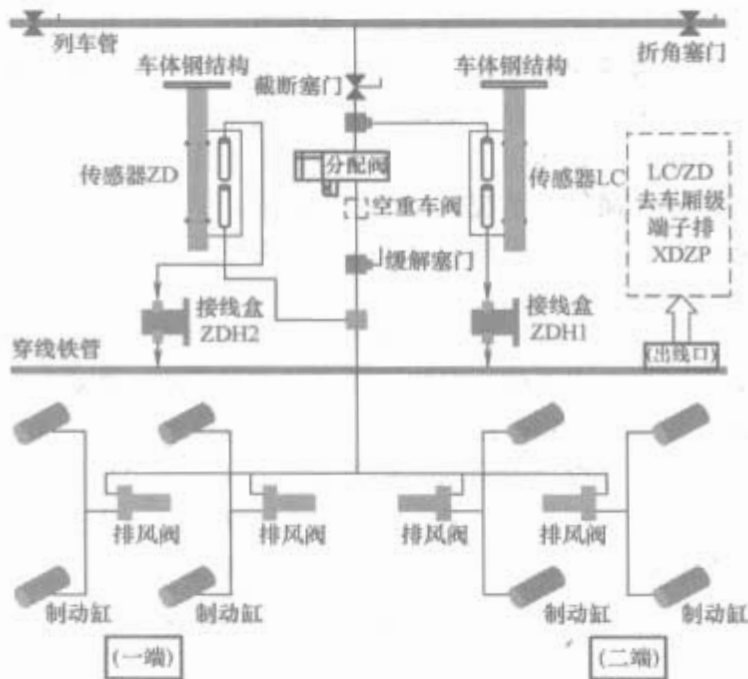


图 2.4-31 制动系统监测诊断子系统测点安装布置图

（3）车辆转向架状态监测诊断子系统。在车辆一、二端的车体、转向架上要安装加速度传感器，以监测轮轴与一系、二系悬挂系统，并根据车体的信号监测整个车辆系统的状态。系统开发的总体考虑是，通过对铁道车辆动力学系统的加速度输出的监测，同时计算系统的时间历程的特征数据，并且对车辆系统振动状况进行评估。将此特征数据经列车网络传输到列车级主机，而后通过特定的系统对车辆的状态以及车辆状态变化过程进行进一步的判断。因而，系统的功能分两方面：

1）车辆功能级实时监测与状态评估。监测车辆转向架及车体横向、垂向振动加速度，报告本车前转向架、后转向架及一系、二系横向和垂向振动情况，转向架失稳情况；判断轮轴系统是否工作正常，车轮踏面是否异常（擦伤、剥离）；判断一系悬挂故障；空气弹簧系统故障的诊断与报警等。

2）车辆维修建议系统（地面数据管理与专家系统的功能之一）。通过将特定时间段的数据导入地面维修建议系统，系统会自动报告此时段车辆的状态，并对维修部位给出建议。同时系统亦可以根据维修情况进行学习，为进一步的车辆系统诊断与态势发展预测提供相关的规律。结合动态的记录与评估建立的地面专家系统，可以对车辆转向架性能变化态势进行预测，实行基于定量分析的质量控制与动态管理，从防止故障出现的源头做起，从根本上防止动力学问题及相关问题的产生，实现车辆的无故障运行。

转向架与车体监测传感器的安装布局如图 2.4-32 所示。

图 2.4-32 中，ZX1 为一位端转向架加速度传感器，监测一位端转向架的垂向与横向振动状况；CT1 为一位端车体监测加速度传感器，监测一位端车体的垂向与横向振动状况；ZX2 为二位端转向架加速度传感器，监测二位端转向架

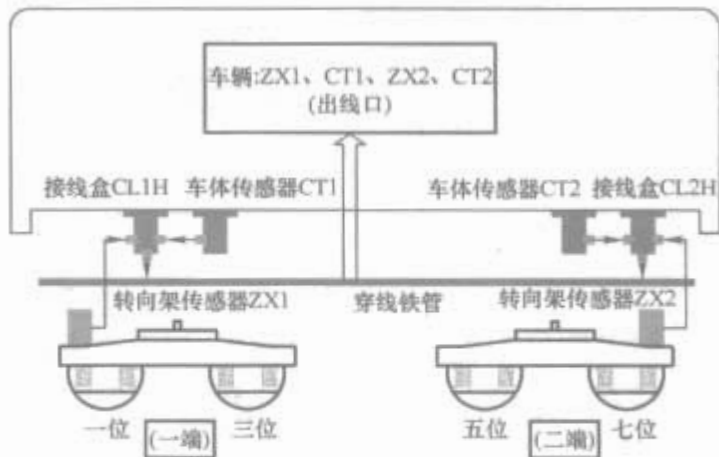


图 2.4-32 转向架与车体监测传感器安装布局图

的垂向与横向振动状况；CT2 为二位端车体监测加速度传感器，监测二位端车体的垂向与横向振动状况。8 路加速度模拟量信号通过接线盒和车下电缆线传送到车辆级主机的 J6 和 J7 监测诊断板卡。

（4）防滑器工作状态监测子系统。防滑器联网，报告防滑器有无故障。若有故障，则指出故障部位，指导维修；报告本车防滑器执行防滑保护动作情况。防滑器向车辆总线发送车辆速度（参考速度或理论速度）和执行防滑保护的情况，作为车辆转向架节点的诊断判断输入条件。

防滑器的主机一方面通过 LonWorks 总线与车辆总线互联（通过 J3 节点）实现网络变量传递；另一方面通过 RS232 与车辆电控 PLC 网关通信，报告本车辆防滑器工作状态和本车参考速度。进口防滑器通过 RS485 同时与车辆电控 PLC 网关和安全系统车辆主机的 J5 节点通信，报告本车辆防滑器工作状态和本车参考速度。

（5）车辆显示节点。本系统的车辆显示节点配上便携式显示器作为车辆级人机接口，用于车辆级各节点的调试确认；本车车辆工厂制造号和车辆顺号也可在车辆显示节点上进行人工设置和修改。板卡上的“LD”显示器显示本车辆顺号。

3.8.2 轴温报警装置

集中式轴温报警器是按照铁道行业标准 TB/T 2226—2002《铁路客车用集中轴温报警器技术条件》所规定的技术要求和生产的新型集中式轴温报警器。

3.8.2.1 主要特点

（1）数字传感器和模拟传感器全自动识别，无须更换模块或切换开关。仪器可以混接两种类型的传感器，并自动显示各轴位的传感器类型，实现了真正的数模兼容。

（2）显示窗口采用超宽温液晶，工作温度范围在-30~80℃，同时显示 9 个轴位的温度。

（3）本车可循环记录 1000 次报警数据（不可人为擦除），记录的报警数据可查阅。

（4）仪器之间采用 FSK 通信方式，每台仪器提供 RS485 输出。

（5）全列配置一台记录仪，用于实时监测全列状态，并记录全列车的轴温数据；配置标准大容量 IC 卡，可循环记录 2000 组全列轴温数据（一列按 20 辆车计），另加 1000 次报警数据。

（6）基于 Windows95/98 的客车轴温数据分析管理系统（V3.0 版）不仅实现了轴承故障的早期诊断，也实现了客车编组和轴温管理的微机化。

（7）增设了 MAX485 接口，可靠实现仪器与车载 PC 机实时通信（动车专用）。

3.8.2.2 主要技术参数

轴温报警装置主要技术参数见表 2.4-12。

表 2.4-12 轴温报警装置主要技术参数

参 数	指 标
电源电压 (V)	DC77~138、DC36~DC72
测量温度范围 (℃)	-45~125
测量精度 (℃)	±1 (20~90)、±2 (<20 或>90)
系统测量精度 (℃)	±2 (20~90)、±4 (<20 或>90)
温度测定路数	8 路轴位, 1 路外温
定点延时 (s)	30±2
传感器	数、模全自动兼容
报警温度 (℃)	90±2
定点报警	环温 45±4
跟踪报警	
报警方式	声光报警, 所有控制显示器同时显示车厢顺位号、轴位号和温度。有多个轴位同时超温报警时, 循环显示所有报警点轴温
车辆数	≤20
控制显示器通信	
通信方式	FSK
数据传输速率 (bit/s)	1200
载波频率	
FL (kHz)	133.05
FH (kHz)	131.85
频率精度 (%)	0.01
工作环境温度 (℃)	-30~50
工作相对湿度 (%)	≤95
消耗功率 (W)	≤4

3.8.3 漏电报警装置

根据供电系统和检测电压的不同, 漏电保护装置可分为直流和交流两种。AC380V 供电系统中有 AC 漏电报警器和 DC48V 直流漏电报警器两种; 在 DC600V 供电系统中采用 DC600V 和 DC110V 两种绝缘检测装置。

3.8.3.1 交流漏电报警器

铁路上已经应用的交流漏电报警器可归为 JYA 系列交流漏电报警器和 NK-1 型交流漏电报警装置两种类型。

(1) JYA 系列漏电报警器。JYA 系列的漏电报警器主要包括漏电检测器和控制器两部分。在线漏电检测的工作原理是: 采用非接触式在线漏电检测, 变流器 CT 实时检测到本车负载对地的漏电流, 并转换成交流毫伏信号, 送到漏电保护器 LD; 经过整流放大后与漏电保护设置值进行比较, 当漏电流大于设置值时, 漏电保护器动作, 切断供电回路, 并使双色漏电指示灯亮。漏电保护值可分为 50、200、150、200、250、300mA 6 挡。控制器设置了漏电声光报警, 当发生漏电时报警器报警, 同时输出一组开关触点, 用于切断供电控制回路的公共线。

报警器试验按钮及试验电路均已安装在报警器内部, 不需外接试验按钮和试验电阻, 也无需在漏电互感器上串绕多圈导线, 安装、接线非常方便。试验电路经特殊设计, 长时间按动不会损坏。其主要技术参数见表 2.4-13。

表 2.4-13 JYA 系列漏电报警器主要技术参数

参 数	指 标
电源电压 (V)	AC220±10%, AC380±10%
环境温度 (℃)	-25~50

续表

参 数	指 标
海拔 (m)	≤2500
相对湿度 (%)	≤80
共模抑制比 (dB)	≥100
触点容量	AC5A、240V, DC5A、28V
漏电流报警动作值 (mA)	150 (内部整定)
动作误差 (mA)	±5

(2) NK-1 型漏电报警器。NK-1 型漏电报警器也包括漏电检测器和控制器两部分。漏电检测器的环形铁心是微晶合金薄片绕制而成, 磁导率高、线性度好、损耗小。控制器的信号调理模块采用新型的集成电路, 线性度好、抗干扰能力强、性能稳定。显示报警及控制电路采用小型单片控制器进行控制, 具有体积小、控制功能强、工作可靠、外围电路简单、操作简便、系统便于升级等优点。同时控制器设置了漏电流指示及预报警功能, 用户可随时了解车体的漏电状况而采取相应的处理措施 (如分断漏电回路), 避免了普通报警器在乘务员完全不知车体漏电状况的情况下突然断电而对旅客及行车带来不便。电路设计上采用了光耦隔离高抗干扰设计及硬件看门狗电路, 提高了电路在强干扰环境下的工作稳定性。软件设计中采用了冗余设计及软件陷阱技术, 当单片控制器受到干扰时, 能自动被纳入正轨, 进一步提高了系统的稳定性与可靠性。其主要技术参数见表 2.4-14。

表 2.4-14 NK-1 型漏电报警器主要技术参数

参 数	指 标
交流电源电压 (V)	AC220
环境温度 (℃)	-25~50
相对湿度 (%)	≤80
共模抑制比 (dB)	≥100
射频场感应的传导抗扰度	A 级
射频电磁场辐射抗扰度	A 级
辐射骚扰	A 级
传导骚扰	A 级

3.8.3.2 直流漏电报警器

根据供电系统的不同, 直流漏电报警器有 DC48V、DC110V、DC600V 3 种类型。

(1) DC600V 在线绝缘检测装置。适用条件为机车 DC600V 电源中性点通过电阻可靠接地。其主要技术参数见表 2.4-15。

表 2.4-15 DC600V 在线绝缘检测装置主要技术参数

参 数	指 标
直流供电电源 (V)	77~137.5
漏电流报警设置值 (mA)	6 挡 (6、10、30、50、100、150), 出厂设定为 100
动作误差 (mA)	7.5
50~150mA	±2
50mA 以下	
预留接口	继电器动合、动断触点各一个 (同一公共端), 触点容量 AC5A 240V, DC5A 28V

装置的主要功能是在线检测 DC600V 供电母线对地绝缘是否良好。当 DC600V 供电母线绝缘漏电流大于或等于设定值时进行报警, 并给出继电器控制信号。

(2) NK-1 系列直流漏电报警控制器。该报警器是根据铁路客车漏电检测、报警的需要而开发的产品, 应用于双线浮空布线的旅客列车直流供电系统的漏电检测 (实际为绝缘

检测)。它对车辆直流供电系统与车体的绝缘状况进行在线实时检测。当供电系统与车体的漏电流超过漏电流报警设定值时,立即发出声、光报警。该系列报警器在线检测的电压不同,但工作原理相同,可以分别用在 DC48V、110V、600V 的检测回路中使用。

1) 工作原理。如图 2.4-33 所示,报警器的信号采集与调理模块采用新型集成电路,灵敏度高、性能稳定、抗干扰能力强、与控制电路高度隔离(完全隔离,无电气直接连接),避免 KLB-1 型直流漏电报警器接入电路后由于自身的分压电阻存在(正极到车体及车体到负极各有一组分压电阻)而使原浮空的电源线变成与车体进行电气连接,降低了电源母线与车体之间绝缘电阻,使原浮空布线变成有源接地布线。改变了原布线设计意图,人为制造了接地,额外增加了接地隐患。即测量电路与 48V(均以 48V 漏电报警器为例进行说明,110V、600V 同)电源电路直联而造成的因控制器自身损坏,引起 48V 电路通过报警器与车体接通,此时无法报警和控制而导致行车事故。

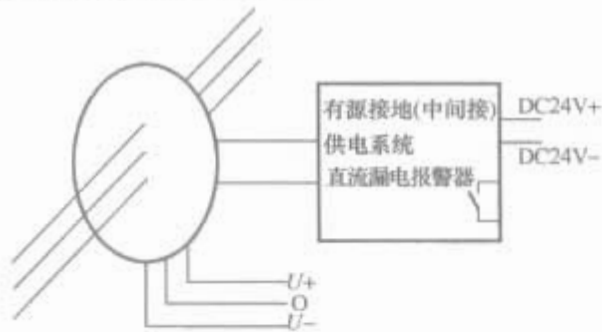


图 2.4-33 NK-1 系列直流漏电报警器原理图

漏电测量电源为电源电压,即电源电压在 44~56V 之间变动时,测量电压自动跟随调整为电源电压(即 44~56V),能准确反映真实的漏电状况(KLB-1 型测量电压为电源电压的一半)。

因信号采集电路采用新型元件及光隔离设计,测量与控制完全隔离,因此该报警器只需对控制电路供电稍加调整便可用于 DC110V、600V 电路漏电检测,控制电路与系统软件均无需调整。

当直流接线端子受潮或浸泡在水中时,直流电源将会对液体进行电解,随着电解继续,导电性能逐渐升高,最终导致端子间发热燃烧。在旅客列车中直流供电(DC48V、110V)均为双线浮空,DC600V 有双线浮空和发动机组有源接地两种。对双线浮空布线而言,其中一极漏电将使车体与该极同电位,但通过车体不形成环路电流。当直流供电正、负极对车体均存在漏电(有漏电阻,尚未短路)时,电源将通过漏电阻形成电流,极端情况将发热燃烧。因此双极漏电为各种漏电中最危险的状况,必须能正确报警。本报警器采用特殊设计,可对上述情况正确报警。同理当负载漏电,如电热器中的电热丝在某个部位与外壳碰极,报警器也能够正确报警,并给出大致漏电部位。

根据需要可增加 RS485 或 RS232C 通信接口,便于报警器间相互通信,以及与上位机之间进行通信或连接报警记录仪。

2) 主要技术参数。见表 2.4-16。

表 2.4-16 NK-1 系列直流漏电报警控制器主要技术参数	
参 数	指 标
电源电压 (V)	
DC48V 报警器	48
DC110V 报警器	110
DC600V 报警器	24

续表

参 数	指 标
典型环境温度 (℃)	-25~50
最高使用温度 (℃)	70
相对湿度 (%)	≤80

3.8.4 火灾报警装置

为保证旅客的人身安全,在乘务员室设有火灾报警控制器,并在客室和包间设有火灾探测器。火灾报警控制器可与火灾探测器组成无极性总线火灾报警控制系统,火灾报警控制器用以监控火灾探测器的运行。

系统装置由火灾报警控制器、光电感烟火灾探测器和连接总线组成。

3.8.4.1 系统原理

火灾报警系统原理如图 2.4-34 所示。

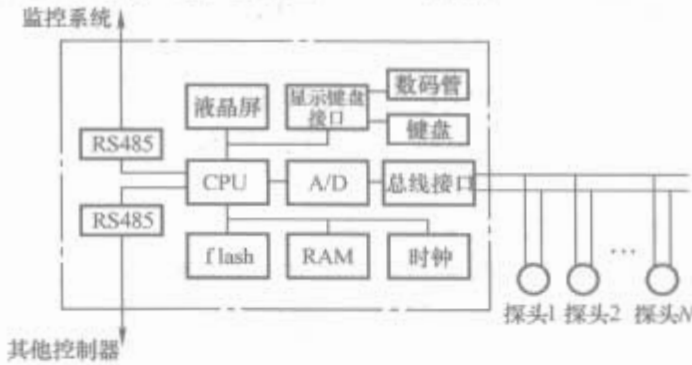


图 2.4-34 火灾报警系统原理框图

3.8.4.2 系统功能

(1) 火灾报警。探测器检测到火警后,报警信息传送到控制器。控制器循环检测,确认火警后,起动火警音响,点亮火警指示灯,显示报警部位火警信息。

(2) 故障检测。如果探测器开路或未接,控制器起动故障音响,点亮设备故障指示灯,显示故障部位信息。如果总线短路,控制器起动故障音响,点亮总线故障指示灯。

(3) 信息传送。当某车厢有火警或故障报警,或者有复位、消音、对时等操作,相应的信息通过 RS485 总线传送到相连的其他控制器。当某一控制器收到信息后,进行相应的处理,做出相应的反应动作。

(4) 自检。进入自检菜单后,控制器报出火警音响、故障音响,点亮数码管、指示灯,检测音响和显示是否正常。

(5) 车辆查询。进入车辆查询菜单,可查询到本车的编号和相连在一起的车辆的编号。

(6) 信息记录和查询。当控制器报出火警或故障信息后,报警的信息被记录。进入查询记录菜单后可查询历史记录。

(7) 设定功能。控制器可根据探头的数量、地址和类型进行现场编程;可根据车辆号设定本机编号;可修改系统时间。

(8) 信息清除。可以根据需要清除现场编程信息、报警历史记录信息。

(9) 探头编址。可通过探头编址操作对探头进行编址。

(10) 与上位机通信。控制器可通过网关与监控系统通信,将本机状态实时发送到监控系统。

3.8.5 客车电气接地要求及装置

客车供电系统的安全设计涉及设备安全和人身安全。客车作为流动的公共场所,容易发生火灾和漏电,一旦发生则后果十分严重。对设备安全、人身安全设计方面应予以特别重视。

3.8.5.1 车体接地保护要求

金属部件和轨道之间的电阻值：客车不大于 0.05Ω ，货车不大于 0.15Ω ；电阻值用 $50A$ 的直流电流测定，测量用电压不高于 $50V$ 。

如果心盘和轴箱等处采用了导电性能差的材料，车辆必须采用下列接地保护措施：

(1) 底架与每台转向架构架（侧架）至少连接一次。

(2) 每台转向架构架（侧架）至少应通过一个轮对可靠接地。

(3) 对于无转向架的车辆，车底架应保证分别通过 2 个轮对可靠接地。

(4) 可采用裸线和绝缘线接地，但必须用抗腐蚀的柔性材料制成，其截面积应保证其导电性能不低于 $35mm^2$ 铜导线的导线性能。接地导线应装设在易观察、易检修的明显部位，同时又能防止机械损伤。

3.8.5.2 车辆部件接地保护要求

如果车顶上部的金属部件与车内容易被触及的能导电的部件相连接，则必须通过车体可靠接地。

运输危险货物的车辆均应该避免由于静电或接触网下垂而引起的火花造成损失，对于各种车辆的具体保护措施应符合 UIC 431-2 的规定。

3.8.5.3 电气设备接地保护要求

与列车供电干线连接的电气设备，其易于被触及的不带电金属部件应按 TB/T 2947《列车干线供电技术条件》规定采取可靠接地方式。车辆中，凡规定中未包括且能被触及的不带电金属部件，在意外情况下也能带电。如果相关电气件的额定电压超过直流 $50V$ 、交流 $24V$ 、中性线不接地的三相交流线电压为 $24V$ 、中性线接地的三相交流线电压为 $42V$ ，则该不带电金属部件必须可靠接地。

接地导线的截面积应根据供电电线的截面积而定，发生故障时，必须保证过载保护装置能可靠动作。

3.8.5.4 天线接地保护要求

安装在车辆外的天线的导电部分必须用耐冲击的绝缘材料制成的保护装置进行保护，以防触及带电接触网。不符合上述规定的车外天线，必须通过高压电容器和浪涌吸收电路同车内部件隔离。

3.8.5.5 车内电气设备接地装置

车内电气设备按照就近接地原则，在电气设备附近的钢结构上焊接不锈钢材质 $M5$ 或者 $M8$ 内螺纹螺套，压接电气设备接地线。

3.8.5.6 EC-3 型客车转向架接地装置

EC-3 型客车转向架接地装置可为铁道客车轴承提供简单、有效、经济的保护和防护，防止工作电流或系统故障电流以及雷电流通过轴承造成的轴承损伤。EC-3 型接地装置结构如图 2.4-35 所示。主要有轴箱盖、摩擦片、轴承连接片、接地装置、密封圈一、防松片、密封圈二、安装螺栓、接地线螺栓、防松片及相关防松件、紧固件构成。

EC-3 型接地装置主要技术参数为：额定电流 $300A$ ；瞬态电流不小于 $10kA$ （有效值），持续时间 $100ms$ ；峰值电流不小于 $25kA$ ；正常工作条件下电刷的更换寿命不小于 80 万 km ；该装置对轴承的温升增加不超过 $3^{\circ}C$ 。

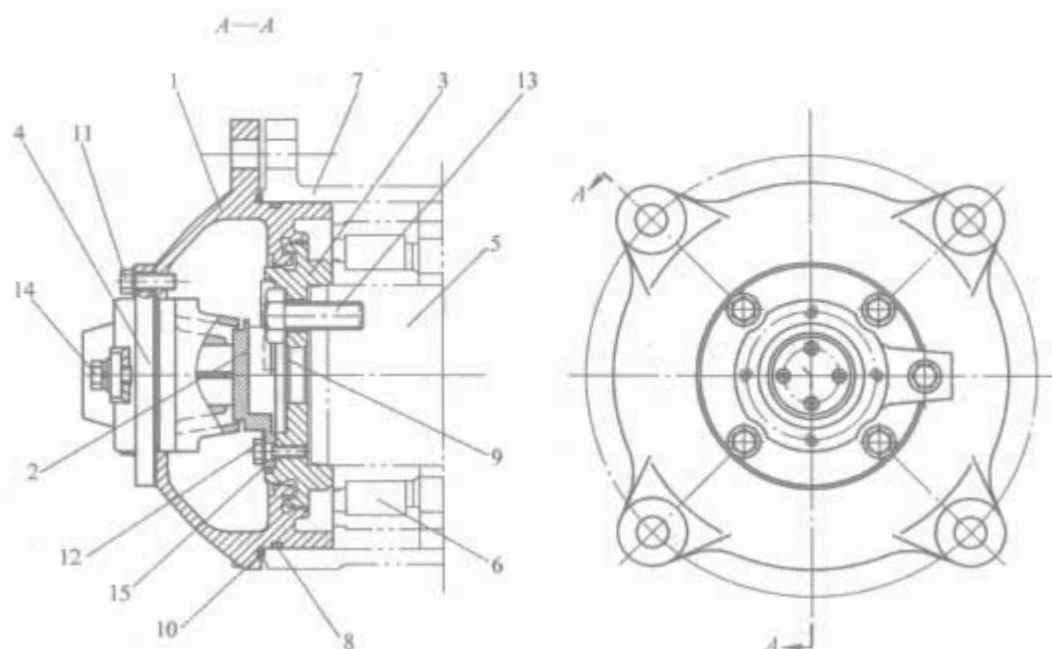


图 2.4-35 EC-3 型客车转向架接地装置

1—轴箱盖；2—摩擦片；3—轴承连接片；4—接地装置；5、6—轴承；7—轴箱体；8—密封圈；9—防松片；10—密封圈二；11—螺栓一 $M10 \times 30$ ；12—螺栓二 $M10 \times 30$ ；13—螺栓三 $M22-6h \times 55$ ；14—接地线螺栓；15—防松片

3.9 客车通风、采暖与空气调节设备

3.9.1 空调机组

铁路客车空调机组的结构型式为车顶单元式，安装在车顶端部。空调机组出风口与车内主风道之间通过软风道连接，处理后的空气经车内主风道由送风口送入客室内，达到调节车内空气温度的目的。

铁路客车空调机组具有耐振、抗冲击，适应风吹、日晒、雨淋等露天环境运行等特点。各型机组可以满足不同列车运行速度的需要。

3.9.1.1 空调机组结构

客车空调机组各零部件组装在一个不锈钢板制成的箱体，加盖板后形成一个整体。空调机组的主要部件包括全封闭制冷压缩机 2 台、冷凝器 2 台、毛细管 2 组、蒸发器 1 台、气液分离器 2 台、干燥过滤器 2 个、电加热器 1 台、离心风机 1 台、轴流风机。

箱体分为室内侧和室外侧 2 部分。压缩机、离心风机、冷凝器布置在室内侧，电加热器、蒸发器等安装在室外侧。空调机组的箱体和上盖全部采用 SUS304 进口不锈钢板制成。组成制冷系统的部件及配管全部采用银钎焊连接，构成全封闭的制冷循环系统，R22 制冷剂封闭在制冷系统内。空调机组的冷风出口设在机组的前端部，回风口在机组的底部中间处，新风口在机组后端部和底部后侧。回风口处装有新风过滤网，可在车内回风口处进行拆装。空调机组蒸发器前设有滤尘网，可在车内回风口处拆装。

3.9.1.2 主要部件

(1) 制冷压缩机。制冷压缩机为全封闭式压缩机，它将电动机、压缩机构及供油系统组装在同一个密封的机壳内。制冷压缩机通过橡胶减振器安装在空调机组箱体内。

制冷压缩机的作用是将来自蒸发器的低温低压的 R22 气体压缩成高温高压的气体，并送往冷凝器。

(2) 室内侧通风机（离心风机）。室内侧通风机为双轴伸直联多叶片式离心风机。室内侧通风机可以强化冷媒在蒸发器中的蒸发过程，并将经蒸发器冷却降温的空气或经电加热器升温的空气送入车内。

(3) 室外侧通风机。室外侧通风机为直联轴流式风机，风机的叶轮安装在立式电机上，并采取防水结构。室外侧通

风机可以强化冷媒在冷凝器中的凝结放热过程。

(4) 室内换热器（蒸发器）。室内换热器即蒸发器，为铜管套铝肋片的直接蒸发式冷却器，一个蒸发器分用于2个制冷循环回路。低温低压的气液混合冷媒在蒸发器内蒸发，当车内循环空气和新鲜空气混合后，通过蒸发器进行热交换。这时空气的热量被蒸发器内的冷媒吸收，温度降低。

(5) 室外换热器（冷凝器）。室外换热器为风冷冷凝器，其结构型式与蒸发器相同。其作用将高温高压的 R22 气体，在外界空气的强制冷却下，变成常温（约 50℃）高压的冷媒液体。

(6) 毛细管。为一组内径极小的细长铜管，它在高压液体冷媒流经时起到节流降压作用。

(7) 气液分离器。气液分离器的作用是将来自蒸发器的冷媒气体与未蒸发的液体分离出来，只将气体的冷媒送给压缩机。

(8) 干燥过滤器。干燥过滤器的作用是将滤网固定在容器内，并封入干燥剂，过滤冷媒中残余杂质，吸取冷媒中的残留水分。

(9) 电加热器。电加热器的作用主要是给送入车内的新鲜空气预热。

(10) 高压压力开关。高压压力开关的作用是当制冷系统的压力异常高时，高压开关动作，停止压缩机的运转，保护制冷系统。高压开关的复位方式为自动复位。

(11) 低压压力开关。低压压力开关的作用是当制冷系统的压力异常低时，低压开关动作，停止压缩机的运转，保护制冷系统。低压开关的复位方式为自动复位。

(12) 过电流继电器。过电流继电器用来保护压缩机。当压缩机电机过负荷或单相运转时，压缩机的工作电流将超过规定值，这时过电流继电器的触点断开将电磁接触器开路，起到保护压缩机的作用。

3.9.1.3 工作原理

(1) 制冷系统的工作过程。客车空调机组制冷系统如图 2.4-36 所示，其工作过程为：将由压缩机压缩成高温高压的 R22 蒸气，送入风冷冷凝器，经外界空气的强制冷却，冷凝成常温高压的液体，进入毛细管节流降压，变成低温低压的气液混合冷媒，然后进入蒸发器，吸收流过蒸发器的空气的热量，蒸发成低温低压的蒸气，再经过气液分离器，被压缩机吸入，完成一个制冷循环。压缩机不断工作，达到连续制冷的效果。

车内的空气通过蒸发器时，空气中的水分冷凝成水滴，

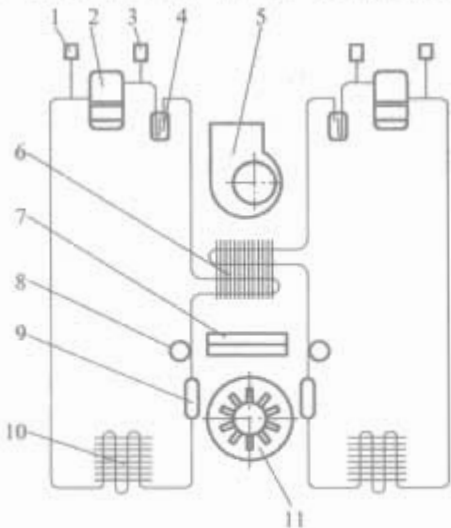


图 2.4-36 空调机组制冷系统图

1—高压开关；2—压缩机；3—低压开关；4—气液分离器；
5—蒸发风机；6—蒸发器；7—电加热器；8—毛细管；9—干燥过滤器；10—冷凝器；11—冷凝风机

被引到车外而起除湿作用。

(2) 降温。车内循环空气及新风道引入的新鲜空气，由机组的通风机吸入，在蒸发器前混合，通过蒸发器得到冷却，并由机组前端部出风口送入车顶通风道各格栅，向车内吹出冷风。在制冷系统连续工作下车内温度逐渐降低，并由温度调节器自动调节车内空气温度。车内空气温度可在 22~28℃ 范围内调节。

冷凝器的冷凝借助于轴流风机，从机组上方吸进外界环境空气，经过冷凝器后，向客车两侧枕木方向排出。

(3) 升温。由新风口引入的新鲜空气及车内循环空气，被机组的通风机吸入在电加热器前混合，通过本装置的电加热器被加热的空气，由通风机送入车内风道各格栅，向车内送热风，使温度慢慢上升，并由温度调节器自动调节车内空气温度，保持车内的温度舒适。

机组的加热工况，主要是用于在寒冷季节对送入车内的新鲜空气进行预热。

3.9.1.4 25T 型车用空调机组主要技术参数（见表 2.4-17）

表 2.4-17 25T 型车用空调机组主要技术参数

型 号	KLD29TD	KLD35TD	KLD45TD
型式	车顶集中单元式		
电源			
主回路电压 (V)	三相交流 380±10%		
频率 (Hz)	50±5% (逆变器供电，有过分相区)		
控制回路 (V)	DC110 (波动范围：DC77~137.5)		
制冷量 (kW)	29	35	45
总风量 (m³/h)			
高速	4500	4500	6000
低速	3000	3000	4000
新风量 (m³/h)			
夏季			
≥35℃	900	600	1000
<35℃	1350	900	1500
冬季			
>-5℃	900	600	1000
≤-5℃ 且 >-20℃	600	400	670
≤-20℃	410	260	420
机外静压 (Pa)	178±15	250±15	210±15
制冷剂	R22		
功率 (kW)	约 14.5	约 15.5	约 20
质量 (kg)	约 750		约 850
电热功率 (kW)	9(4.5+4.5)	6(3+3)	9(4.5+4.5)

3.9.2 废排风机

废排风机为直联轴流式风机，其作用是将客室内一部分空气排出，保证客室内新鲜空气供给。

25G 型车用废排风机及 25T 型车用废排风机的主要技术参数见表 2.4-18。

表 2.4-18 25G 型和 25T 型车用废排风机的主要技术参数

参 数	硬座车	软卧车	硬卧车
风机型式	直联轴流式		
风叶直径 (mm)	300		
单相交流电源			
电压 (V)	220±10%		
频率 (Hz)	50±10%		

续表			
参 数	硬座车	软卧车	硬卧车
整机绝缘电阻值 (MΩ)	≥2		
噪声等级	≤60dB (A) 距风机 1m 为半径处测量		
风量 (m³/h)			
25G 型	1400	700	1200
25T 型	900/600	600/400	1000/670
全压 (Pa)	70~80	35~45	55~65

3.9.3 电取暖器

电取暖器是当空气调节装置冬季取暖不足时,在客车内部采用电热元件补充热量的一种采暖装置。其采暖功率根据新造车技术条件中的要求和 KKCTG4-2《普通客车采暖热负荷计算方法》的理论进行计算。电取暖装置与空气调节装置实行正联锁,分强、弱两档采暖。

根据电热元件的不同,电取暖器分为电热管式和电热板式两种,其中电热板式电取暖器又分为交流 380/220V 和直流 600V 供电两种形式。

电取暖器应符合 TB/T 2704—2005《铁道客车电取暖器》要求,下面具体介绍电热板式电取暖器。

3.9.3.1 技术参数

(1) 在室温 18~20℃、无风条件下,电取暖器在额定工作条件下工作 1h,外罩板表面任意点最高温度应不高于 68℃。

(2) 电取暖器工作时,任意部位不得有火灾隐患,并不得散发有害气体及异味。

(3) 交流 AC380V 供电的电取暖器在 (40±1)℃ 的老化房内加交流 297V、50Hz 条件下工作 720h 应无损坏 [DC600V 供电的电取暖器在 (40±1)℃ 的老化房内加直流 600V 条件下工作 720h 无损坏]。

(4) 电取暖器应能在振动试验台上承受纵、横、垂三个方向加速度 1g,且历时各 2h 无损坏。

(5) 电取暖器应能在冲击振动试验台上承受纵、横、垂三个方向加速度 3g,历时 2min 无损坏。

(6) 电取暖器按 GB/T 2423.4—1993 试验,最高温度 40℃,湿度 95%,试验周期 6 个循环后,应符合部颁辆客函 [1997] 5 号《铁路客车板式电热取暖器技术条件》中 1.2.4.2~1.2.4.4 规定要求。

(7) 电取暖器应具备可靠的防水性能。

(8) 电取暖器电源引出线必须采用耐油、耐高温阻燃的铜电源线。

(9) 电源为三相四线制 AC380/220V,频率为 50Hz,或 DC600V。

(10) 接地螺栓应作固定处理,以防接地线时打转。

3.9.3.2 电取暖器用电热芯片

(1) 电热芯片在下列情况下应能正常工作:电压为 AC (220±22) V、频率 50Hz,或 DC (600±60) V;环境温度为 (−40~+40)℃;空气相对湿度不大于 90%。

(2) 芯片的散热片应采用带散热翅片导热良好的铝型材,并做发黑处理。

(3) 外观表面不得有明显的伤痕或局部膨胀、收缩,不得有气孔、砂眼等缺陷。

(4) 主要性能。在额定工作电压下芯片的额定功率偏差应在 −2%~+5% 范围之内。在冷态 (室温) 时,芯片的绝缘电阻不得低于 500MΩ;在热态 (最高工作温度) 时,芯片的绝缘电阻不得低于 100MΩ;在湿热条件下,芯片的绝缘电阻不得低于 20MΩ (使用 500V 绝缘电阻表)。在冷态或热态时,芯片应能承受交流 2000V 电压 1min,无击穿、闪络现象,此时高压回路电热芯片漏电流应小于 10mA,1000W 以上电热取暖器每增加 100W 允许增加 0.1mA;湿热状况应能承受 1700V 电压历时 1min,无击穿、闪络现象。电热取暖器在热态或湿热条件下,在额定电压、额定功率时,电热芯片漏泄电流不大于 1mA/kW。输入电压为额定电压的 1.27 倍时,电热取暖器应能正常工作。在额定电压条件下工作时,通电 1h 后,电热芯片任意点最高温度不得大于 165℃。电热芯片接缝密封胶必须耐热、耐油。电热芯片电源引出线单根所承受的拉力应不小于 98N,拉伸值不得大于 2mm/m。电热芯片电源引出线与芯片连接的根部,在承受 98N 拉力后,拉出值应小于 0.5mm,并不得出现根部密封胶脱落、裂开情况。拉力试验后应做浸水试验。

(5) 寿命要求。在正常使用条件下,电热芯片使用寿命不低于 10000h。

(6) 电热板主要由发热板、散热翅片组成,电热板接线柱部分采用耐温聚四氟乙烯材料密封,如图 2.4-37 所示。

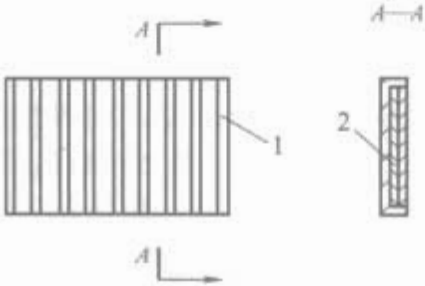


图 2.4-37 电热板结构
1—散热翅片; 2—发热板

3.10 客车其他电气设备

客车还配备了其他的电气设备,包括电动内端门控系统、塞拉门控制系统、电开水炉、电温水箱、照明灯具、列车电话和餐车厨房电气设备等。在青藏铁路运营的 25T 型客车为了解决高原区段旅客缺氧问题,车内还配置了制氧系统。

第 5 章 牵引供电系统与设备

1 铁路干线牵引供电系统

电气化铁路是指从外部电源和牵引供电系统获得电能，通过电力机车牵引列车运行的铁路。它包括电力机车、机务设施、牵引供电系统、各种电力装置以及相应的铁路通信、信号等设备。

电气化铁路的牵引动力是电力机车，机车本身不带能源，所需能源由电力牵引供电系统提供。牵引供电系统主要是指牵引变电所和接触网两大部分。牵引变电所设在铁路附近，它将从发电厂经高压输电线送来的电能，送到铁路上空的接触网上。接触网是向电力机车直接输送电能的设备。沿着铁路线的两旁，架设着一排支柱，上面悬挂着金属线，即为接触网，它也被看作是电气化铁路的动脉。电力机车利用车顶的受电弓从接触网获得电能，牵引列车运行。牵引供电制式按接触网的电流分为直流制和交流制两种。直流制是将高压、三相电力在牵引变电所降压和整流后，向接触网提供直流电，这是发展最早的一种电流制，现已较少采用。交流制是将高压、三相电力在牵引变电所降压和变成单相后，向接触网提供交流电。交流制供电电压较高，发展很快。我国电气化铁路的牵引供电制式从一开始就采用单相工频（50Hz）25kV 交流制，这一选择有利于今后电气化铁路的发展。

电力牵引按其牵引网供电电流的种类可分为工频单相交流制、低频单相交流制和直流制。直流制仅用于矿山电力牵引、城市电车和城市轨道交通。我国干线铁路均采用工频单相交流制，这种电流制的电力机车在牵引网上获得电能，在机车上降压后经过交—直或交—直—交变换再供给直流或交流牵引电动机。

由于频率提高，牵引网的阻抗加大，牵引网电压也相应地提高，目前我国干线铁路牵引网采用的均是 25kV。牵引供电系统如图 2.5-1 所示。

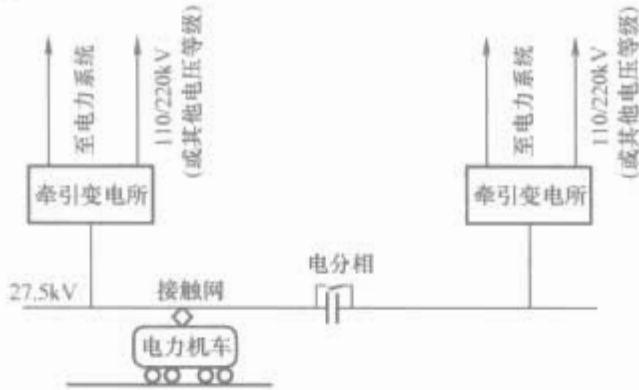


图 2.5-1 牵引供电系统示意图

采用工频交流制具有如下优点：

- （1）容易变压，牵引网采用高压送电，牵引变电所间距增大。
- （2）与电力工业标准频率一致，使供电系统的结构和设备大为简化，牵引网结构简单，牵引变电所建筑面积缩小。

1.1 牵引供电系统

1.1.1 供电方式

1.1.1.1 供电制式

单相工频（50Hz）交流。

1.1.1.2 工作电压

（1）牵引变电所进线电压根据外部电源情况一般选择为 110kV 或 220kV，特殊地区（如西北电网）可选择其他电压等级。

（2）铁路干线牵引变电所牵引侧母线上的额定电压为 27.5kV，自耦变压器（AT）供电方式为 $2 \times 27.5\text{kV}$ 。

（3）接触网的标称电压为 25kV，长期最高电压为 27.5kV，短时（5min）最高电压为 29kV，设计最低电压为 20kV，供电系统非正常情况下不得低于 19kV。

1.1.1.3 供电方式

牵引网是由接触网和轨道地回路构成的供电网的总称。牵引网供电方式根据外部电源情况以及防干扰的要求选择直接供电方式（带回流线）或自耦变压器（AT）供电方式。当采用 AT 供电方式时，需考虑最佳的 AT 间距和钢轨的最高电位及分布对设备和人身安全的影响。两种供电方式的技术特点比较见表 2.5-1。

表 2.5-1 两种供电方式的技术特点比较

供电方式	带回流线的直接供电方式 (TRNF)	自耦变压器供电方式 (AT)
牵引网结构	接触导线+承力索+回流线；也可增设加强线；结构较简单	接触导线+承力索+正馈线+保护线；必须全线设正馈线；结构复杂
牵引网阻抗	较大	小，在相同导线结构组成情况下约为直供方式的 50%~60%
供电臂长度	较短；分相数量较多	长；分相数量较少；牵引变压器容量较大
牵引供电设施	变电所数量较多，选址相对不利；供电设施较少	牵引变电所数量少，选址相对有利；需设置 AT 所，供电设施多
负序影响和对系统容量的要求	较小	大
外部电源点的要求	需要外部电源点相对较多；外电投资相对较大	电源点相对较少；投资较小
防干扰能力	比自耦变压器供电方式略差	效果好
维护工作量/电气化投资	较小	大

牵引网采用单边供电，末端设分区所，以实现上下行接触网并联供电及越区供电。

1.1.1.4 牵引变电所的布点间距

牵引变电所的分布应由供电计算并综合考虑一些因素确定。

(1) 牵引供电计算方法。计算步骤大概为：确定供电方式→建立牵引供电系统数学模型→假定牵引变电所位置及其供电范围→牵引供电系统计算。其中，牵引供电计算的主要技术指标为：车站里程（站间距）、供电臂长度、牵引变压器接线型式及备用方式、主变压器容量（含容量利用率）、20min 电流、最大负荷电流、并联补偿容量、接触网末端最低电压水平及所采用的补偿措施等。

根据对上述技术指标进行计算，参考相应的技术规程、规范，若技术指标均满足技术要求且经济合理，则所假定的牵引变电所位置及其供电范围成立；否则需调整牵引变电所位置及其供电范围。

根据机车负荷的大小、特性及机车运行的密度，考虑在满足接触网最低工作电压的情况下，应结合线路地形、地貌及桥隧分布情况，尽可能延长牵引变电所的间距。同时在确定牵引变电所供电范围时应考虑相关的电压水平、设备的载流能力等相关限制条件。

(2) 需综合考虑的因素。包括以下 5 方面：

1) 布点应按远期需要设置。

2) 靠近负荷中心。

3) 牵引变电所的供电范围应考虑运营管理机构的管理范围，供电范围不应跨铁路局（公司）。

4) 与邻线及支线相互支援方便。

5) 外部电源工程量小。

1.1.2 牵引变压器类型和容量

1.1.2.1 牵引变压器接线型式

目前我国电气化铁路应用的牵引变压器的接线型式主要有以下几类：

(1) 三相双绕组 Y/△接线（YNd11）牵引变压器。这是我国电气化铁路最早使用的牵引变压器，结构简单，造价低；但容量利用率较低，安装容量较大，基本电费多，对电力系统的负序影响较大。

(2) 单相接线牵引变压器。结构最简单，易维护，能耗低，容量利用率最高，安装容量小，基本电费少，可减少电分相数量，有利于提速；但对电力系统的负序影响较大，只能用于电力系统较强的地区，且必须征得电力部门认可方可使用。

(3) V/V 接线牵引变压器。有三相 V/V 接线和单相 V/V 接线两种，其接线简单，制造容易，二相容量可根据需要进行不同配置，容量利用率高，运营费用少，其中三相 V/V 接线比单相 V/V 接线更易实现固定备用；但 V/V 接线牵引变压器的一次绕组为全绝缘，一次侧中性点无法引出，对电力系统的负序影响与三相接线（YNd11）牵引变压器基本相同。

(4) 三相/二相平衡接线牵引变压器。该类牵引变压器接线型式较多，容量利用率较高，能有效降低电气化铁路负序对电力系统的影响，但结构工艺较复杂，制造成本相对较高。应用较广的有 SCOTT 接线、YN/V 接线等。其中 SCOTT 接线变压器一次侧无法接地，绕组绝缘水平较高，中性点易漂移；YN/V 接线阻抗匹配平衡牵引变压器一次侧能够接地，二次侧有△绕组，三次谐波可以流通，磁通势波形较好。

随着两部制电价的实施以及国家有关负序、谐波标准的发布，为节省投资、降低运营成本，电气化铁路牵引变压器类型的选择显得越来越重要。

两部制电价对牵引变压器的安装容量按月收取基本电费。因此，牵引变压器类型的选择既要满足输送能力的需

要，又要尽量降低牵引变压器的安装容量以减少铁路运营部门运营费用的支出以提高经济效益，还要结合电力系统的发展规划充分考虑电气化铁道负荷特性及其对电力系统的影响。为此，一般选取单相接线、三相 V/V 接线和阻抗匹配平衡 YN/V 接线三种。这些都是近年来有广泛应用且容量利用率比较高的接线型式，具体选择可经技术经济综合比较而确定。

1.1.2.2 牵引变压器容量计算

(1) 牵引变压器容量。根据 TB/T 1651—1996《牵引变电所变压器容量的计算条件和方法》进行计算，即考虑按需要通过能力、机车类型、列车牵引质量、信号闭塞方式等计算条件进行计算。

(2) 牵引变压器容量的确定。按正常运行状态确定牵引变压器计算容量，按其允许过负荷能力对尖峰负荷进行校核，确定校核容量，以二者之大者确定牵引变压器的安装容量。根据选用的牵引变压器类型，确定其过负荷倍数。

(3) 各种牵引变压器容量计算公式。

1) 计算容量。分别按以下几种接线计算：

a. YNd11 接线对称结构。这种接线的计算公式为

$$S = K_t U \sqrt{4I_{x1}^2 + I_{x2}^2 + 2I_{p1} I_{p2}}$$

或

$$S = K_t U (2I_{x1} + 0.65I_{x2}) \quad (2.5-1)$$

其中

$$K_t = 0.87 + 0.04 = n_B$$

式中：\$K_t\$ 为温度系数；\$I_{p1}\$、\$I_{x1}\$ 为重负荷臂对应于正常运行列车对数时的电流平均值和有效值，A；\$I_{p2}\$、\$I_{x2}\$ 为轻负荷臂对应于正常运行列车对数时的电流平均值和有效值，A；\$U\$ 为牵引变电所母线额定电压，27.5kV；\$n_B\$ 为轻负荷臂与重负荷臂电流有效值之比，即 \$n_B = I_{x2}/I_{x1}\$。

b. YNd11 接线不对称结构。这种接线方式下变压器容量取为 YNd11 接线对称结构的 0.8 倍。

c. 单相接线。这种接线的计算公式为

$$S = UI_x \quad (2.5-2)$$

$$I_x = \sqrt{I_{x1}^2 + I_{x2}^2 + 2I_{p1} I_{p2}} \quad (2.5-3)$$

式中：\$I_x\$ 为牵引变电所母线对应于正常运行列车对数时的电流有效值，A。

d. 单相（或三相）V/V 接线。这种接线的计算公式为

$$S_1 = UI_{x1} \quad (2.5-4)$$

$$S_2 = UI_{x2} \quad (2.5-5)$$

式中：\$S_1\$、\$S_2\$ 为两臂计算容量。

e. SCOTT 接线。这种接线的计算公式为

$$\text{当 } I_{TX} > I_{MX} \text{ 时 } S = 2UI_{TX} \quad (2.5-6)$$

$$\text{当 } I_{TX} < I_{MX} \text{ 时 } S = U\sqrt{3I_{MX}^2 + I_{TX}^2} \quad (2.5-7)$$

式中：\$I_{TX}\$、\$I_{MX}\$ 分别为 T 座、M 座对应于正常列车对数时电流有效值，A。

f. 阻抗匹配平衡接线。这种接线的计算公式为

$$S = k_t UI_{x1} \sqrt{(2+\sqrt{3}) + (2-\sqrt{3})n_B} \quad (2.5-8)$$

$$k_t = 0.94 + 0.06n_B \quad (2.5-9)$$

式中：\$k_t\$ 为温度系数；\$n_B\$ 为轻负荷臂与重负荷臂电流有效值之比，即 \$n_B = I_{x2}/I_{x1}\$。

2) 校核容量。分别按以下几种接线计算：

a. YNd11 接线对称结构。这种接线的计算公式为

$$S = K_t U (2I_{max1} + 0.65I_{x2}) / K \quad (2.5-10)$$

式中：\$K\$ 为过负荷倍数；\$I_{max1}\$ 为重负荷臂对应于 95% 概率列车对数时的电流值，A；\$I_{x2}\$ 为轻负荷臂对应于紧密运行列车对数时的电流有效值，A。

b. YNd11 接线不对称结构。这种接线的校核容量取为 YNd11 接线对称结构的 0.8 倍。

c. 单相接线。这种接线的计算公式为

$$S = UI_x / K \quad (2.5-11)$$

$$I_x = I_{\max 1} + I_{x_2} \quad (2.5-12)$$

式中: I_x 为牵引变电所母线电流值, A。

d. 单相 V/V 接线。这种接线的计算公式为

$$S = 2UI_{\max 1} / K \quad (2.5-13)$$

e. 三相 V/V 接线。这种接线的计算公式为

$$S_1 = UI_{\max 1} / K \quad (2.5-14)$$

$$S_2 = UI_{\max 2} / K \quad (2.5-15)$$

式中: $I_{\max 1}$ 、 $I_{\max 2}$ 为两臂对应于 95% 概率列车对数时的电流值, A。

f. SCOTT 接线。这种接线的计算公式为

$$\text{当 } I_{T\max} > I_{M\max} \text{ 时 } S = 2UI_{T\max} \quad (2.5-16)$$

$$\text{当 } I_{T\max} < I_{M\max} \text{ 时 } S = U\sqrt{3I_{M\max}^2 + I_{T\max}^2} \quad (2.5-17)$$

式中: $I_{T\max}$ 、 $I_{M\max}$ 分别为 T 座、M 座对应于 95% 概率列车对数时的电流有效值, A。

g. 阻抗匹配平衡接线。这种接线的计算公式为

$$s = k_t UI_{\max 1} \sqrt{(2 + \sqrt{3}) + (2 - \sqrt{3})n_B^2} / K \quad (2.5-18)$$

其中

$$n_B = I_{\max 2} / I_{\max 1}$$

1.1.2.3 各种接线变压器高低压侧输出电流计算

(1) YNd11 接线对称结构。这种接线的计算公式为

$$\text{高压侧 } I_A = I_C = \frac{S}{\sqrt{3}U_1} \quad (2.5-19)$$

$$\text{低压侧 } I_a = I_c = \frac{S}{\sqrt{3}U_2} \quad (2.5-20)$$

式中: S 为牵引变压器额定容量, kVA; U_1 为牵引变压器一次侧电压, kV; U_2 为牵引变压器二次侧电压, kV。

(2) YNd11 接线不对称结构。这种接线的计算公式为
高压侧 A、C 相绕组电流

$$I_A = I_C = 1.25S / (\sqrt{3}U_1) \quad (2.5-21)$$

高压侧 B 相绕组电流

$$I_B = 0.5S / (\sqrt{3}U_1) \quad (2.5-22)$$

低压侧 a、c 相绕组电流

$$I_a = I_c = 1.25S / (3U_2) \quad (2.5-23)$$

$$\text{低压侧 b 相绕组电流 } I_b = 0.5S / (3U_2) \quad (2.5-24)$$

$$\text{低压侧 } \alpha、\beta \text{ 相输出线电流 } I_\alpha = I_\beta = 1.25S / (\sqrt{7}U_2) \quad (2.5-25)$$

$$\text{低压侧 c 相接地电流 } I_{cd} = \sqrt{3}I_a = 1.25S / (\sqrt{3}U_2) \quad (2.5-26)$$

(3) Y/V 阻抗匹配平衡变压器。这种接线的计算公式为

$$\text{高压侧输入电流 } I_A = I_B = I_C = \frac{S}{\sqrt{3}U_1} \quad (2.5-27)$$

$$\text{低压侧输出电流 } I_a = I_\beta = \frac{S}{2U_2} \quad (2.5-28)$$

两供电臂负荷相等时:

$$\text{低压侧绕组电流 } I_{ac} = I_{bc} = 0.8165I_a \quad (2.5-29)$$

$$I_{ab} = 0.2989I_a \quad (2.5-30)$$

$$\text{低压侧接地电流 } I_{ce} = \sqrt{2}I_a \quad (2.5-31)$$

(4) 三相 V/V 接线变压器 (单相接线变压器)。这种接线的计算公式为

$$I_A = \frac{S_A}{U_1} \text{ 或 } I_C = \frac{S_C}{U_1} \quad (2.5-32)$$

$$I_a = \frac{S_A}{U_2} \text{ 或 } I_c = \frac{S_C}{U_2} \quad (2.5-33)$$

$$\text{中相 } I_b = \sqrt{I_a^2 + I_c^2 + 2I_a I_c \cos 60^\circ} \quad (2.5-34)$$

1.1.2.4 采用了 Y/V 阻抗匹配平衡变压器相关问题

(1) 站用变压器的选择。采用平衡变压器, 相角差从 120° 变为 90° , 即变压器输出的 α 、 β 相对 C 相形成相角差为 90° 的二相制电源, 所以站用变压器 (一般为 50~100kVA 的 27.5/0.4~0.23kV 的供站内自用电的配电变压器) 应选用逆斯考特变压器, 将 27.5kV 的二相制电压再逆变为 400~230V 的三相四线制电源, 以解决站用电问题。

(2) 由于 α 、 β 两相对 C 相相角差为 90° , 因而 $U_{\alpha\beta}$ 为 $(\sqrt{2} \times 27.5) \text{ kV} = 38.89 \text{ kV}$, 是 YNd11 接线的 $\sqrt{2}$ 倍, 这样要求区间馈电线之间的绝缘距离应比 YNd11 接线的牵引变电所增加 $\sqrt{2}$ 倍。

1.1.3 谐波和负序的影响

1.1.3.1 谐波的影响

我国干线铁路全部采用的是单相工频 25kV 交流制, 而电力机车目前大部分仍为整流型交一直电力机车。牵引供电系统的接触网向电力机车供给与横坐标成镜像对称的非正弦电流, 而该电流可分解为基波和各奇次谐波电流, 所以电力机车可理解为奇次谐波电流源。

电力机车产生的谐波电流, 通过牵引变电所内的牵引变压器的合成和变换, 从牵引变电所高压侧母线注入电力系统公用电网, 在其向电气化铁路供电的公共连接点 (PCC 点) 的等效相阻抗上产生谐波电压, 从而对电网中的一些电气设备产生不同程度的有害影响。

(1) 电气化铁路谐波监测点。电气化铁路谐波监测点为 110kV 及以上电压等级的电力系统变电所 (或电厂) 向电气化铁道和其他用户供电的公共连接点 (缩写为 PCC)。

(2) 电气化铁路总谐波电压畸变率的限值。电气化铁路谐波对电力系统的影响, 根据电气化铁路负荷的特殊性, 用在 PCC 上电气化铁路负荷产生的总谐波电压畸变率 V_{DT} 为衡量, 其正常限值为 2%, 最大限值为 4%。

(3) 电气化铁路总谐波电压畸变率的测量和取值。在电力系统正常工况和日牵引负荷、其他负荷共同作用下, 在 PCC 上, 一昼夜内连续测量 1440 个合成总谐波电压畸变率 v_{DS} 值 (每次取 1min 的方均根值), 按大小排列, 取前 72 个 (5%) 的方均根值为高值, 其余的方均根值为低值; 再将对应求得的高值和低值, 按公式

$$V_{DT} = \sqrt{V_{DS}^2 - V_{DB}^2} \quad (2.5-35)$$

消除 PCC 上的背景总谐波电压畸变率 V_{DB} , 分别求得电气化铁路总谐波电压畸变率的高值和低值, 作为判断电气化铁路谐波是否超过最大限值、正常限值的依据。

(4) 目前我国电气化铁路治理谐波的通用做法如下:

1) 在牵引变电所 27.5kV 母线上装设并联电容无功补偿装置。并联电容无功补偿装置中的参数选择以滤去 3 次谐波为主。一般情况下, 并联电容补偿装置的可靠系数 K 取 1.08, 补偿度 α 取 0.12。

2) 减少谐波的发生量。变流器的多脉波化是一种行之有效的措施, 它不但可使谐波次数的数量减少, 而且使各次谐波含量也大大减少, 从而使流入系统的谐波电流也大为减少。

3) 在机车上加装并联补偿滤波装置。该装置一般由 3 次和 5 次独立的支路构成, 分别吸收对应次的谐波电流, 从而降低机车谐波含有率。

4) 牵引变电所接入短路容量大的公共连接点、电力系统调整运行方式等。

1.1.3.2 负序的影响

单相牵引负荷接入电力系统时将在系统中引起正序和负序电流,如图2.5-2所示。

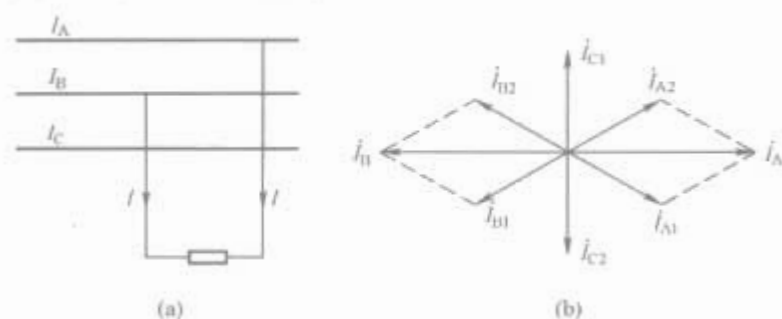


图 2.5-2 单相牵引负荷接入电力系统
(a) 示意图; (b) 相量图

根据图 2.5-2 (a), 显然

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I \\ I_B &= I \\ I_C &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5-36)$$

以 I 为基准, 如图 2.5-2 (b), 将三相电流分解为两个相序相反的对称三相电流, 则

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} &= \dot{I}_A \\ \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} &= \dot{I}_B \\ \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} &= \dot{I}_C \end{aligned} \right\} \quad (2.5-37)$$

正序电流和负序电流可用对称分量法求得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) \\ \dot{I}_{A2} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) \end{aligned} \right\} \quad (2.5-38)$$

式中: a 为运算子; $a = e^{j120^\circ}$; $a^2 = e^{j240^\circ}$; $a^3 = e^{j360^\circ} = 1$; $1 + a + a^2 = 0$ 。

对于图 2.5-2 (a) 中的单相负荷, 则

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= 1/3(\dot{I} - a\dot{I} + 0) = \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_{A2} &= 1/3(\dot{I} - a^2\dot{I} + 0) = \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I} \angle 30^\circ \end{aligned} \right\} \quad (2.5-39)$$

按对称关系和相应相序, 两组正序和负序电流分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_{B1} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I} \angle -150^\circ \\ \dot{I}_{C1} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I} \angle -270^\circ \\ \dot{I}_{A2} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I} \angle 30^\circ \\ \dot{I}_{B2} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I} \angle 150^\circ \\ \dot{I}_{C2} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I} \angle 270^\circ \end{aligned} \right\} \quad (2.5-40)$$

因此, 单相牵引负荷在三相电力系统中将产生负序电流, 但不产生零序电流。

牵引负荷对电力系统的负序影响主要有对同步发电机、电动机、电力变压器、送电线路和继电保护五个方面。

(1) 对同步发电机的影响。包括以下四个方面:

1) 单相牵引负荷引起发电机的不对称运行。从发电机的安全运行考虑, 其每相电流均应不超过额定值。因此这实

际上限制了发电机的出力, 并将使其超过额定温升。

2) 产生附加振动。当负序电流流过发电机时, 其负序电流产生的负序旋转磁场, 以同步转速 ω 的 2 倍速度切割转子, 产生负序同步转矩, 使发电机产生附加振动。

3) 造成定子各部分不均匀发热。由于漏磁通使定子槽内导线中的电流发生集肤效应, 引起定子绕组铜的附加损耗, 在定子端接部分使端盖板和压环中产生涡流, 从而产生附加损耗。

4) 引起转子表面发热。负序电流在转子中引起的感应电流不仅引起附加振动, 而且该电流在转子中会产生附加损耗。

(2) 对电动机的影响。电力系统中的动力负荷大部分为感应电动机。当负序电流流入电力系统时, 将造成电动机端子三相电压不对称而使正序分量减小。当电动机的机械功率不变时, 必将引起定子电流的增加, 并造成各相电流的不平衡, 从而降低运行效率, 使电动机过热。

(3) 对电力变压器的影响。由于负序电流造成三相电流不对称, 因而电力系统三相变压器有一相电流最大而不能有效发挥变压器的额定出力。另外, 还造成变压器的附加能量损失和在变压器铁心磁路中造成附加发热。

(4) 对送电线路的影响。负序电流流过电力网时, 负序功率实际上并不做功, 而只造成电能损失, 从而降低了电力网的输送能力。

(5) 对继电保护的影响。容易使系统中以负序分量起动的继电保护及高频保护误动作, 从而增加保护的复杂性。

减少负序影响的措施有:

- 1) 选取高电压等级供电。
- 2) 牵引变电所选择短路容量大的公共连接点。
- 3) 相邻的牵引变电所进行相序轮换。

1.1.4 牵引供电系统补偿措施

1.1.4.1 串联电容补偿装置

在牵引供电需要的时候, 在牵引网中采用串联电容补偿装置是改善牵引网电压状态行之有效的方法, 如图 2.5-3 所示。

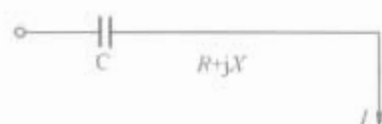


图 2.5-3 串联电容补偿装置示意图

牵引网阻抗表示为 $R+jX$, 负载电流表示为 I , 图 2.5-3 的左端为馈电点, 则牵引网中的电压损失为

$$\Delta U_q = I(R\cos\varphi + X\sin\varphi) \quad (2.5-41)$$

式中: $\cos\varphi$ 为牵引负载的功率因数。

若用 X_C 表示电容器容抗, 则负载电流 I 通过电容器时的电压损失为

$$\Delta U_C = -IX_C\sin\varphi \quad (2.5-42)$$

即电容器出口电压将高于其入口电压, 从而达到提高牵引网电压的目的, 且其提高电压的数值与负荷电流成线性。

1.1.4.2 并联电容无功补偿装置

对于相控整流型交直电力机车, 其功率因数普遍偏低, 因此, 有必要在牵引变电所内部装设并联电容无功补偿装置。这样做可以: ①提高功率因数; ②减少电力系统能耗; ③改善电力系统电压质量, 提高牵引网电压; ④吸收高次谐波, 达到滤波的目的。并联电容无功补偿装置主要有以下几种形式:

(1) 不可调的固定补偿装置。根据牵引负荷剧烈变化的

特点和当前技术经济的需要和可能，一般采用在牵引变电所内装设不可调的固定补偿装置。按补偿装置在牵引变电所内安装位置可有牵引侧滞后相（或引前相）集中补偿、牵引侧二相等容量补偿和牵引侧二相不等容量补偿 3 种方案。

(2) 静止型动态无功补偿装置 (SVC)。动态无功补偿可避免固定补偿装置在大负荷时补偿量不足，小负荷或线路空载时过补偿的缺点，还可有效提高牵引母线电压，改善变电所供电能力。SVC 的主要型式有晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电容器 (TSC)、可控饱和电抗器补偿装置 (SR)。

1) 27.5kV 可控饱和电抗器与固定电容器的综合无功补偿。在牵引母线上投入固定电容器（可构成 3 次、5 次滤波器）与可控饱和电抗器，电容器产生超前无功电流，饱和电抗器产生滞后无功电流，而以调节电抗器电感量来改变其电流。根据牵引负荷无功功率的大小，自动调节可控电抗器的电感量，便可控制变电所的综合无功功率和功率因数。补偿主电路如图 2.5-4 所示。

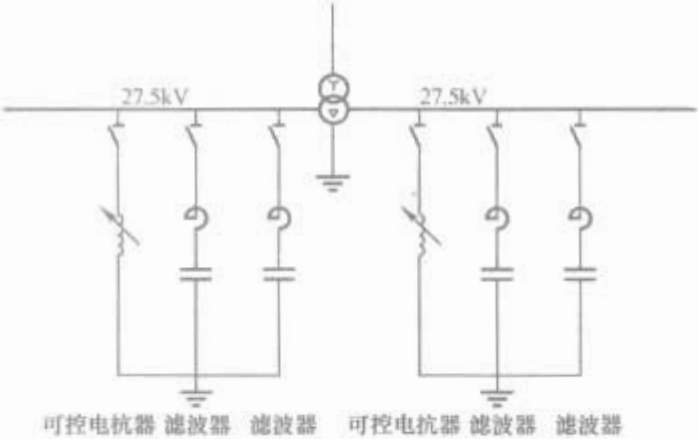


图 2.5-4 可控电抗器与固定电容器的综合无功补偿主电路

可控电抗器具有 4 个铁心柱，在中间两个心柱上绕有电抗器的主绕组和励磁控制绕组。两柱励磁方向相反，一个心柱的磁路在电压的正半波饱和，另一个心柱的磁路在电压的负半波饱和，通过调节励磁绕组电流来改变铁心柱的饱和度。随着铁心饱和度的增加，磁导率 μ 减小，电抗器的电感量 L 减小，电抗减小，因而电抗回路的电流增加。可控电抗器原理如图 2.5-5 所示。

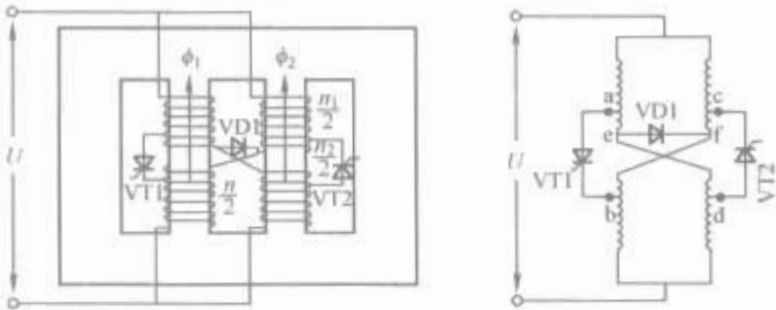


图 2.5-5 可控电抗器原理图

可控电抗器与固定电容器的综合无功补偿方式的主要特点是：可实现无功功率无级自动控制，控制相对比较简单，无须大容量晶闸管阀来调节，在变电站加装可控电抗器和相应控制设备容易实现，它与固定补偿电容器在控制上无直接关系，可靠性高，适于既有变电站的改造。但由于装置实现原理决定电抗器电流波形畸变，含有较大谐波量，特别是 3 次有最大的分量，超过 12%；噪声大，噪声来源于铁心的深度饱和；可控电抗器本身损耗大，在有噪声段，损耗超过 3%；因电抗电流是补偿电容器超前无功电流，当牵引负荷较大时，电抗电流较小，电抗器损耗也小，而当负荷较小或空载时，电抗器为大电流或满载电流，因而损耗也大，这对

空载率高的线路是十分不利的。因此，本补偿方案虽然已在个别牵引变电所试点运行成功，但由于存在上述不足，并未在我国电气化铁路中推广应用，国外电气化铁路中也鲜有应用报道。

2) 晶闸管控制电抗器与固定电容器的综合无功补偿 (TCR+FC) 方式。在牵引母线上投入固定电容以及晶闸管阀串联的、为固定电感量的电抗器。TCR 控制器根据牵引网电压 u 、电流 i 来综合给出控制角 α ，用 α 来改变相控电抗器中的电流，也就是电抗器中的电流，从而实现平滑调节无功功率的目的。负载无功的变化正是由 TCR 所产生的变化无功功率加以平衡，使得两者之和总是维持为常数；此常数感性无功功率被 FC 的容性无功功率相抵消，最终使得电网的功率因数保持在较高的水平，同时使牵引网电压保持在要求的范围内。TCR 主电路如图 2.5-6 所示。

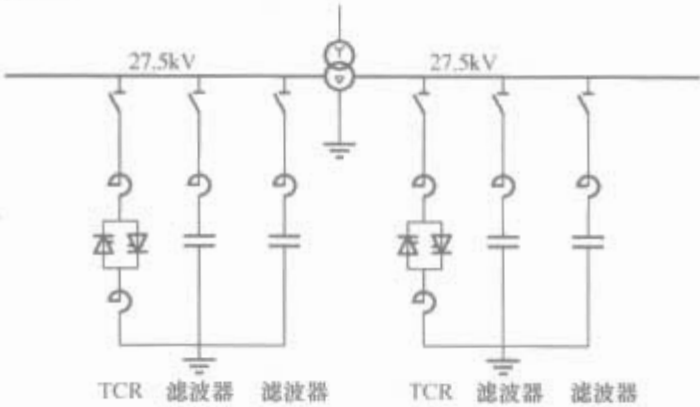


图 2.5-6 TCR 主电路图

采用 TCR 与固定电容器并联的方式，能够以足够快的速度跟随牵引供电系统负载的频繁变化，还能补偿一定的谐波电流。在国外，该补偿方式已普遍应用于电气化铁道。TCR 补偿方案能实现功率因数无级自动调节，反应速度快，补偿效果好；对设备技术要求高，特别是用于调节电抗器电流的晶闸管阀；电抗器损耗相对较大，因供电臂牵引负荷大时，电抗器电流小，无载或轻载时，电抗器满负荷工作。对牵引负荷变化大和线路空载率高的区段，补偿装置常年损耗不可忽视。

3) 晶闸管电子开关分组投切电容器 (TSC)。在牵引母线上通过变压器降压到合适的电压，按补偿需要在此补偿母线上设置电容器支路（也可设置成滤波器），控制器根据牵引网电压 u 、电流 i 来计算需投入的电容器支路，通过晶闸管电子开关控制电容器支路的投入与切除，实现有级调节无功功率的目的，最终使电网的功率因数保持在较高的水平。降压 TSC 主电路如图 2.5-7 所示。

降压 TSC 方式能够以足够快的速度补偿牵引负荷产生的无功电流，还能降低流入系统的谐波电流。在电力网配电网中，该补偿方案得到广泛应用。晶闸管电子开关投切时无电流冲击与过电压，本身不产生谐波，克服了真空开关投切

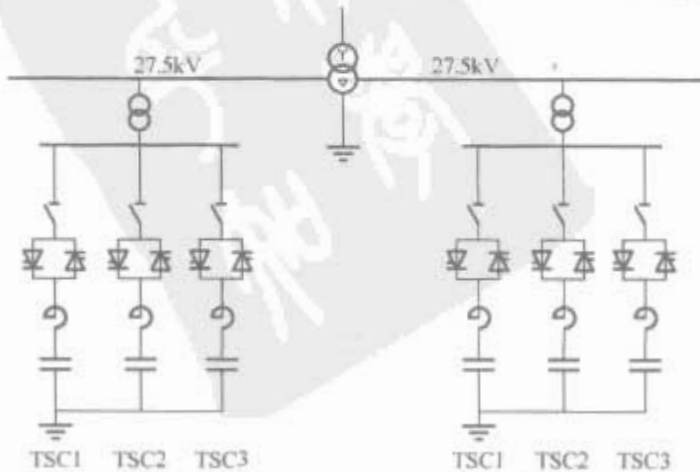


图 2.5-7 降压 TSC 主电路图

补偿电容的所有弊端。但是它最大的不足就是不能够连续调节，只能分级调节。不过应当注意到，一个铁路供电系统正常情况下比一个公共电力供应系统能够承受更高的电压波动值，因此，只要分级控制电压变化在这些限定值以内，就是可接受的。另外采取分成多组的方式，无功调节也可完全满足系统要求。因此这种方法特别适用于行车密度低，且列车为重载的区间。

1.1.4.3 有载调压变压器（增压变压器）

目前开通的电气化铁路的牵引变压器一般采用无载分接开关。正常电网供电的牵引变电所分接开关一般处于额定挡位（第Ⅲ挡）。为了保证 27.5kV 母线的空载电压为 29kV，现场使用时可根据电力系统情况调节分接开关的挡位。虽然自动有载调压变压器已在电力部门广泛使用，但在牵引供电系统中，由于牵引负荷波动很大，频率高，使用上受到限制，主要原因为有载调压开关需根据动作次数定期滤油，加大了运营单位的维护工作量。近年来，由于真空有载分接开关的出现及自动控制设备技术水平提高，有载分接开关的开断能力增强，使用寿命延长，从而为自动有载调压技术在牵引供电系统中重新采用提供了技术保证。经技术经济比较，选择有载调压变压器（增压变压器）方案，可以有效减小电网波动的影响，使牵引变电所母线电压稳定在 24~29kV 之间运行。

1.1.4.4 采用大容量的牵引变压器

增大牵引变压器容量可减少牵引变压器电压损失，从而提高牵引网末端最低电压水平。但由于我国目前采用的是两部制电价，增大牵引变压器安装容量就意味着加大基本电费，提高运用成本。因此，目前工程设计中一般不采用这种方法。

1.2 干线牵引变电所

1.2.1 110kV（或 220kV）侧的电气主接线

牵引变电所的主要功能是降压，即把由电力系统引入的高等级电压降为电气化铁路牵引变电所需要的电压等级。铁路电力牵引属于一级负荷，牵引变电所必须引入 2 路独立可靠的电力输电线路。目前已开通的牵引变电所进线电源均由铁路以外的电力系统供电，多采用 110kV 及以上电压等级，各牵引变电所 110kV（或 220kV）侧从电力系统引入的 2 路独立电源，均作为主供电源，一主一备，当一回路发生供电故障，另一回路自动投入，保证不间断供电。牵引变电所的主接线，按满足供电可靠、运行灵活、操作检修方便、节约投资和便于扩建及出线回路数，并根据容量规模、性能要求、电源条件、设备特点等条件确定。牵引变电所接线形式一般有线路分支（双 T）接线、桥形接线、线路变压器组接线。表 2.5-2 所列为常用的典型主接线。

表 2.5-2 常用的典型主接线

接线形式	单线图	优缺点	适应范围
分支接线（双 T）		运行操作灵活，检修方便	多采用此接线

续表

接线形式	单线图	优缺点	适应范围
外桥形接线（或内桥）		设备较多，二次保护相对复杂	电力系统有穿越功率
线路变压器组接线		接线清晰简单，保护简单	电力系统电网较好

牵引变电所内设 2 台牵引变压器，采用一主一备运行方式，实现备用变压器自投（在变压器两侧设断路器）。电力系统电网较强时可优先采用线路变压器组接线或单相牵引变压器。在电气化铁道早期，牵引变压器也有采用移动变压器备用方式（所内设 2 台变压器，并联运行，当其中一台故障或检修，移动变压器接入系统，替代已退出运行的牵引变压器）。随着人们对电气化铁道可靠性认识的加深，新建的牵引变电所牵引变压器都采用冗余配置，即 1+1 的固定备用方式。

在电气化早期，由于电力系统电网不发达（特别是在边远山区），在牵引变电所内 110kV 母线上接上铁路地区用电或铁路贯通线用变压器，即所内在 110kV 母线上单独挂了 110/35/10kV 电力变压器，但目前这种接线已基本不用。

1.2.2 27.5kV（或 2×27.5kV）侧的电气主接线

牵引变电所 27.5kV（2×27.5kV）侧母线一般采用单母线分段的接线方式，实现在全所不停电条件下对母线及与母线相连的设备进行分段检修。27.5kV 断路器采用固定备用方式，馈至同一方向的上下行馈线采用 50% 备用，其他馈线采用 100% 或 50% 备用。采用哪种备用方式，应根据馈线数目、场坪房屋布置情况确定。当同相馈线数目在 4 回及以上时，多用单母线带旁路母线接线。在既有牵引变电所改造中确定 27.5kV 侧接线，应视房屋布置情况、改造工程及过渡实施条件，有条件地采用单母线分段接线。

牵引变电所设 2 台所用变压器，接于 27.5kV 母线上。在铁路电力设计时，为解决沿线车站信号、通信或隧道通风、照明等电力用电，一般沿铁路线 30~40km 设一个变配电所，并架设 10kV 电力贯通线路。由于 10kV 贯通线有多路电源，又是对称平衡系统，所与所之间互备，因此，为保证牵引变电所用电的可靠性，有条件的应有一台 10/0.4kV 变压器（地方接入或从 10kV 铁路贯通线上引接），并作为主电源。

一般在大站或枢纽站有车场及机务设施，供电的回路数较多，设置开闭所（不进行电压变换而用开关设备实现电路开闭的配电所）进行分场分束供电，电压为 27.5/27.5kV，设置断路器，对接触网短路故障进行保护。开闭

所的电压采用 2 路 27.5kV 电源进线，互为备用，并实现备用电源自动投切，其进线电源可从就近的牵引变电所单独出一间隔，亦可从接触网上 T 接一回，作为所内进线电源。进线处设置断路器，在断路器外侧设置电动隔离开关。馈线侧采用带旁路母线的单母线分段接线，设一台备用断路器。

分区所设于两个牵引变电所之间，可使相邻的接触网供电区段（同一供电臂的上、下行或两相邻变电所的两供电臂）实现并联或分开供电。分区所采用断路器（或负荷开关），构成四边形接线，实现上、下行并联供电和越区供电，提高供电灵活性。根据运行情况，分区所可采用断路器，也可采用负荷开关不带保护。当采用负荷开关不带保护时，牵引变电所馈线保护可以以供电臂为单元，实现分区所两侧的某一区段接触网发生短路故障的保护。

在自耦变压器供电方式（AT 供电方式）中，在供电臂的中间或沿线每隔 10km 左右（一般以每个 AT 段只能有一列车作为控制条件）设置一台自耦变压器 AT（即 AT 所），2×27.5kV 在上下行线路间用两台隔离开关相连，在该开关内侧设两台自耦变压器，每台自耦变压器通过双极电动隔离开关接到进线上。按运行方式，两台自耦变压器既可以一台投入，一台备用；也可分别投入。2×27.5kV 接线应满足上、下行并联供电，也可采用断路器接线方式；AT 分区所、自耦变压器所自耦变压器宜采用固定备用接线方式。

开闭所、分区所、自耦变压器所（AT 所）均设置所用变压器，二次操作可交流亦可直流（为保证可靠性，牵引变电所、开闭所一般采用直流操作）。另外电气主接线还要结合电气布置方案、进所通道（设置铁路专用线路还是公路运输方案）、运行检修是否灵活、方便等因素确定。

1.2.3 电气设备的配备

牵引变电所设备的目标是为负荷提供连续不间断的供电，最大限度地采用标准的、自动化程度高、通用性强的设备，这是保证可靠性的措施，即工程的可靠性很大程度上取决于牵引供电设备的质量、系统设备的配置与选用。

电力网中，由于综合自动化设备特有的功能和已有成功经验的应用，变电所无人值班的管理方式已成为电网的发展方针。铁路供电设备的配置也从现代化牵引变电所去设计；从运营管理模式、调度分层控制管理方式及变电所内自动化水平相互关联的系统工程角度去考虑，有一个总体的设计方案、一次及二次设备（含调度自动化和通信设备）配备方案。

1.2.3.1 牵引变电所设备配置情况

牵引变电所设备配置情况见表 2.5-3。

表 2.5-3 牵引变电所设备配置情况			
项目名称	传统变电所	新建牵引变电所	技术说明
设备配置	选用性能优良、维护工作量小的设备，27.5kV 分相装设固定电容补偿装置设备有一定的余量	选用性能优良、维护工作量小的设备，可在 27.5kV 侧装设 SVC，设备应有较大的储备量，部分设备按 1:1 冗余配置	设备运行操作或故障操作可通过自动化系统进行，减少人为失误，降低了出差错的几率
通用性	通用及标准化设备较低，设备配备标准低，维修量较大	选用自动化程度高、通用性强的标准化设备，可评定标准设备的通用率，用少维护或免维护产品	标准设备与日本、法国标准设备相比，通用率较低

续表			
项目名称	传统变电所	新建牵引变电所	技术说明
设计方案	主接线采用冗余配置：110kV 电源、牵引变压器、所用变压器均为一主一备，馈线 1:n 备用	除传统主接线采用冗余配置，设计方案采用冗余系统配置，更具有适应供电系统特点功能的接线，简单、更可靠	为完成同一任务而采用了多重配置系统，各单元全部失效系统才失效
自动化程度	传统二次设备（电磁式、集成电路、微机、PLC）加远动，远动上传量不多	采用技术先进的综合自动化，双总线网络。分布式、各模块相互独立	实时显示系统运行方式
远动通道	音频电缆、电力线载波、光纤通信	光纤通信	音频电缆、受电磁干扰大，误码率高
管理方式	垂直管理，铁路局下属供电段负责运行维护检修，调度控制中心直接对牵引变电所进行“三通”	维持既有管理模式或由综合检修基地或独立的运营公司进行运行维护，综合调度控制中心对变电所进行“五遥”，实现无人值班	采用分层、分级控制，实现电气设备绝缘综合在线监测，状态检修

1.2.3.2 设备主要性能参数

牵引变电所设备的配置标准是根据电气化铁道牵引供电装备现代化的要求，参照国标、IEC 标准、欧洲标准，2004 年铁道部编制了《电气化铁路供电设备器材技术条件（暂行）》，结合各条铁路干线的使用环境、线路技术标准、融资方案等具体情况，确定设备配置标准。表 2.5-4 规定了牵引变电所高压电气设备的冲击试验及工频试验电压值。

表 2.5-4 牵引变电所高压电气设备冲击试验及工频试验电压值					
电压等级(kV)		220	110	55	27.5
额定电压(有效值)(kV)		220	110	55	27.5
最高工作电压(有效值)(kV)		252	26	63	31.5
1min 工频耐压(有效值)(kV)	相对地	395	185/230	140	85/95
	相 间	395	185/230	140	85/95
	断口间	460	210/230	140	110
雷电冲击耐压(峰值)(kV)	相对地	950	450/550	325	185/200
	相 间	950	450/550	325	185/200
	断口间	1050	520/550	325	215/220
控制电路、辅助电路 1min 工频耐压(V)		2000			
电流互感器和电压互感器的二次侧绕组 工频 1min 耐压(V)		2000/3000			

- 注 1. 表中所列试验电压系指 1000m 海拔地区值，高于 1000m 海拔地区值应根据 GB、TB 标准相应提高。
2. 额定电压 27.5kV 为单相设备，其 5% 的闪络电压应大于 39kV。
3. 斜线 “/” 下为选择值。
4. 设备的绝缘水平可执行 TB/T 2805—1997 规定，分变压器、高压电器、高压电缆、母线支持绝缘子穿墙套管类，对应不同的选择值；表中个别值比标准高，采用的是常用值。
5. 特别注意：单相电气化铁道 27.5kV 绝缘水平不同于电力系统三相 35kV 绝缘水平。

1.2.3.3 牵引变压器

由于牵引负荷具有波动性大、短路故障较多、机车产生谐波等特点，运行环境比一般电力负荷恶劣，因此要求牵引变压器过负荷和抗短路冲击的能力强，这也是牵引变压器区别于一般电力变压器的特点。在“铁路干线牵引供电系统”章节中，对牵引变压器接线型式、容量计算进行了详细的分析，在此只对过负荷能力，即典型运行负荷曲线、环境温度、绕组热点温度、顶层油面温度进行简述。

牵引变压器区别于电力变压器之一是牵引负荷不是均匀负载，而且短期严重过负荷，对于不同铁路线（单、复线）列车运行组织，牵引变压器的过负荷能力的要求也是不同的，因此应针对实际运输情况对制造厂提出负荷曲线的要求。较为典型的过负荷能为 0.75 倍额定电流可持续 23min；2.0 倍额定电流，可持续 10min，3.0 倍额定电流，可持续 2min。一昼夜中 3.5h 按上述周期运行，其余时间内负荷电流为额定电流的 50%。

过负荷能力与绝缘、冷却介质的耐温等级和周围环境有关。一般油浸自冷或风冷牵引变压器的最高油平均温度为 80℃ [最高周围环境温度加油平均温升，即 $(40+40)^\circ\text{C}=80^\circ\text{C}$]；当以硅油作为绝缘、冷却介质时，硅油的最高平均温度将达到 $(40+100)^\circ\text{C}=140^\circ\text{C}$ ，因此，在选牵引变压器时，绕组热点温度 140℃，顶层油温 105℃。在连续额定负荷情况下，相对于绝缘的耐热等级为 A 级时，绕组平均温升为 65K（电阻法），油层的顶部为 55K（温度计法），因此在牵引变压器二次保护整定时应根据各条铁路线的运行负荷情况，对牵引变压器的过负荷能力进行修正。牵引变压器过载能力和抗短路冲击的能力除执行国家标准外，还应执行 TB/T 1680—2006《铁路应用机车车辆牵引变压器和电抗器》标准。

1.2.3.4 电流互感器、电压互感器

110kV 电流互感器、电压互感器的选择与电力设备一样。铁路干线牵引变电所 110kV 互感器有油浸、六氟化硫（SF₆）、干式绝缘的互感器。

SF₆ 和干式电流互感器与传统的同类产品相比具有维护量小、精度高、不易老化、不会爆炸起火等特点，可作为传统油浸式产品的更新换代产品。同时，也可降低因设备漏油造成环境污染的概率。

110kV 电压互感器多采用电磁式（三相五柱式）或电容分压式。它们均有较好的伏安特性而不易激发铁磁谐振。三相五柱式电压互感器由于零序磁通经过 2 条边返回，磁路长，铁心截面积小，零序磁通遇到的磁阻大，谐振就不容易产生。电容分压式互感器具有耐电强度高，绝缘裕度大，运行可靠等特点，能在从低到高的任何电压下有效阻尼各种频率的铁磁谐振。另外电容分压式互感器亦可兼作耦合电容器，用于电力线载波通信系统。

牵引变电所的计量有高压侧计量和低压侧计量 2 种方式。具体方式应按接入电力系统的要求，一般在电气化铁道与电力系统公共连接点 PCC 装设计量装置，也有的装设在牵引变压器 27.5kV 侧，按独立的计量箱（有单装电流互感器、电压互感器）设置。计量用的电压互感器和电流互感器的准确度等级应由用户和电网运营商协商确定。一般 110kV 电流互感器、电压互感器计费线圈采用 0.2S 级；一次侧电流按不同接线型式的牵引变压器计算电流，考虑电流互感器可过载 1.3 倍或按比回路中正常工作电流大 1/3 左右，以保证测量仪表的最佳工作，在过负荷时使仪表有适当的指示，其校验按电力设备要求进行。

1.2.3.5 断路器

断路器可以带负荷切断各种电气设备和牵引网线路，更可与保护装置配合，快速、可靠地切断各种短路故障。断路器要具有开断相应电压等级电网最大极限短路电流的能力，既能开断额定的出线端短路电流，也能开断与额定短路开断电流相应的近区故障电流。110kV 断路器一般为少油或 SF₆ 断路器，配液压或弹簧操动机构。目前新建的牵引变电所采用 SF₆ 断路器较多，主要是 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质的断路器，具有较强的开断能力。特别是近 10 年来，自能式灭弧（热膨胀式灭弧室，热膨胀加助推压气式灭弧室）在断路器研发设计和制造技术的应用和利用电弧的阻塞效应来提高高压气缸中 SF₆ 气体的压力，使断路器需要的操作功降低，无油气泄漏以及在大容量开断采用动静触头双动结构等技术特点，使高压断路器的单断口能力大大增加。

结合牵引供电负荷特点，向接触网供电的馈线中应设置能分断可能出现的最大短路电流和分断感性小电流的断路器。从我国电气化铁路 27.5kV 断路器使用的情况来看，SF₆ 断路器和真空断路器均有使用，早期 SF₆ 断路器使用较多。由于真空断路器动作速度快及有较高的开断次数、不污染环境、更能适应接触网倒闸及频繁的故障，新建的敞开式布置牵引变电所多采用真空断路器。

选择 27.5kV 断路器时要着重分析断路器的开断次数，这主要是基于牵引网故障较多，线路发生故障后将引起牵引变电所馈线断路器跳闸。据统计，一年中牵引网上的故障占牵引供电系统全年故障的 73% 左右，这就对馈线开关设备提出了更高的要求。开关设备在频繁开断短路及电容电流的情况下应有足够的机械寿命和电气寿命，保证连续分合动作的要求。当电铁牵引动力为交—直电力机车时，车上整流机组固有的特性会使系统参数发生变化。为改善牵引供电系统的功率因数、减少流入电力系统中的谐波电流，一般在牵引变电所 27.5kV 侧母线上装有固定的并联电容无功补偿装置。铁路用的电容器组为单相的一端接地的电感电容串联电路、谐波吸收电路，其操作过电压可达电源电压峰值的 4~6 倍以上，比三相的 LC 串联电路操作过电压略低些。因此，若使用 35kV 绝缘件（其对地电压只为 $35/\sqrt{3}=20.2\text{kV}$ ），耐受电压裕度较小。在选择真空断路器时，特别要注意断路器的截流水平，截流过电压的高低与真空断路器的截流值 I_c 的大小有关；同时，在开断电容器组时不应产生高的过电压（不超过 2.5 倍），以及由过电压产生的巨大涌流，以免造成对电容器组的损害。按国家标准规定，断路器投切电容器组的开断电流为 200、400A（有效值），关合涌流为 20kA（峰值）。

在城市或山区，由于征地困难或土建工程量较大时，牵引变电所 110kV（或 220kV）设备采用户外或户内 GIS 组合电器或采用（HGIS 或 PASS）高压组合开关，27.5kV 采用室内充气开关柜（GIS）或室内空气开关柜（AIS）。

断路器的技术参数见表 2.5-5。

表 2.5-5 断路器技术参数（仅供参考）

参 数	指 标	
额定电压(kV)	110	27.5
最高工作电压(kV)	126	31.5
额定电流(A)	1600	1600
额定频率(Hz)	50	50
额定短路开断电流(kA)	40	31.5

续表		
参 数	指 标	
额定短路关合峰值电流(kA)	100	63
额定峰值耐受电流(kA)	100	63
额定短路持续时间(s)	3	4
分闸时间(ms)	≤30	≤40
合闸时间(ms)	≤50	≤75
燃弧时间(ms)	—	≤15
额定操作程序	分—0.3s	分—0.3s
	—合分—	—合分—
	180s—合分	180s—合分
六氟化硫气体额定气压(MPa)	≤0.5	—
	水分含量	—
	(V/V)≤150×10 ⁻⁶	—
三相合闸不同期(ms)	≤5	—
三相分闸不同期(ms)	≤3	—
额定短路开断电流次数(次)	—	20
额定电流次数(次)	—	10000
机械寿命(次)	≥10000	20000
额定电容器组开断电流(A)	—	200 400
额定电容器组关合涌流(kA)	—	4 8
灭弧室开断额定电流(次)	电触点:30000	30000
1min工频耐压(有效值)(kV)	230	95/110
雷电冲击耐受电压(峰值)(kV)	550	185/215

注 1. 配弹簧操动机构。
2. 厂家应提供灭弧室的真空度及触头磨损的检测方法。且真空度要求在 1.33×10^{-3} Pa 以上,真空灭弧室的有效期不应小于 20 年。
3. 相关的技术参数见 TB/T 2803—1997 或 2004 年铁道部编制的《电气化铁路供电设备器材技术条件(暂行)》,根据需要,用户可与厂家协商对相关参数进行调整。

1.2.4 接地装置与防雷保护

牵引变电所、开闭所、分区所等接地装置与防雷保护、接触电势和跨步电势、室外设备的接地与室外接地线连接、室内接地线与室外接地网连接、外部栅栏单独接地等应符合现行国家标准。

1.2.4.1 铁路牵引变电所回流

直接供电方式的 110kV 电气化铁路牵引变电所内,当设有铁路专用线时,牵引变压器的接地 C 相(回流相)应与牵引变电所钢轨和接地网相连。牵引变压器回流时用 2 根铜排分别接到所内的铁路钢轨两侧,铁路岔线在信号轨缝绝缘后,各用 2 根扁钢将所有的轨缝焊接,同时用扁钢将 2 根钢轨连接至信号扼流变压器中性点(与正线相连);从牵引变压器接地 C 相的端子箱中用铜排和所内主地网连接。在没有铁路岔线的牵引变电所,采用架空回流线接至所外接触网回流杆塔上,同时与站线或正线所设置的信号扼流变压器中性点相连。

AT 供电方式的牵引变电所、AT 所和分区所,将 N 线浮空并在 N 线和地之间加装放电间隙,为短路故障时提供一个良好的金属通路,以便降低接地电阻和保护动作。TA 供电方式更能适应大功率负荷供电,同时可减少牵引网电气分段对机车速度和受流影响。高速铁路由于列车密集到发,一个供电臂的牵引负荷电流一般在 800A 以上,牵引供电系

统又直接接入 220kV 大电流接地系统,此时外引至所内的故障电流(二相接地短路)很大,比一般 110kV 系统三相短路电流大 1 倍以上。因此,随着高速铁路的建设,电力机车类型的改变(功率的增大),在采用 220kV 电压等级供电时,近端短路电流增大,牵引供电系统的接地就应从牵引变电所、接触网、钢轨、通信设备作为一个整体考虑,设置综合接地,从系统防雷、变电所强弱电接地要求、钢轨电位、接触电势、跨步电势要求和回流要求,构成一个强弱电共用、兼顾防雷和回流的综合接地系统,有效地保证各类电气设备的运行安全。

1.2.4.2 牵引变电所接地装置与防雷保护

(1) 根据各线的年平均雷暴日数,确定所属雷区。为防止直击雷,各牵引变电所内设置独立避雷针或避雷线。每个牵引变电所设 3~4 只独立避雷针,也可按避雷针兼投光灯塔设计,避雷针设置位置、高度视牵引变电所场坪布置而定。一般避雷针设置在所内四角,其中心与围墙的距离为 1500mm。在 27.5kV 馈线出口也可设置抗雷圈,以防止雷击通过接触网串入牵引变电所。

(2) 在牵引变压器高、低压侧及中性点和 27.5kV 母线、馈出线上均设置相应电压等级的氧化锌避雷器,用以防止操作过电压和感应雷击。

(3) 自动装置、综合自动化系统外接端口采用光电隔离措施,并设置过电压保护设备,防止过电压波入侵。

(4) 牵引变电所接地装置的布置以水平长孔接地网为主。电气设备四周辅以方孔,在设备集中接地附近设置垂直接地体。

(5) 对高土壤电阻率的牵引变电所,采用加大接地网面积、外引至土壤电阻率较低处或敷设降阻剂等方法降低接地电阻。

(6) 牵引变电所接地电阻按 $R \leq 2000/I_d$ (Ω) 计算,在 110kV 系统,系统最大短路电流一般在 4000A 左右,可取 0.5 Ω 设计。高土壤电阻率地区需采取措施,不满足要求时,接地电阻按 $R \leq 5\Omega$ 设计。在山区线路工程实施过程中,现场情况往往与设计勘探的地质资料不吻合,因此,设计中应按规程的要求对相关专业(信号、给水等)的工程作必要的处理,以满足接地的要求。采用综合接地后接地网最大接地电阻仍为 $R \leq 2000/I_d$ (Ω)。由于 I_d 越大,对 R 要求越高,当难以满足要求时,需对接地装置进行接地处理。

接地安全电位按 IEC/TC64 规定,在干燥或湿润区域,交流 50V 以下不需要直接接触电防护,即正常运行时不大于 50V。

1.2.5 牵引变电所综合自动化装置

牵引变电所内二次保护测量设备(即低电压、弱电流的设备)的连接是对主接线中的设备工作状态进行控制、监察、测量以及实现继电保护与远动调度管理。牵引变电所的保护控制设备也与电力系统一样经历了电磁式保护、晶体管继电保护、集成电路保护和微机保护,正向计算机化、网络化、智能化、保护、控制、测量和数据通信一体化快速地发展。

牵引变电所综合自动化装置主要完成对本层内牵引供电设施的当地控制、数据采集、保护及数据集中处理;同时通过专用数据通道与调度中心设备组网构成完整的牵引供电远动系统。

牵引变电所内设综合自动化装置及视频安全监控系统终端,采用分层分布式结构,纵向分为站级层、网络层和间隔层。

牵引变电所综合自动化系统一般分为保护测控单元、当地监控单元、通信管理单元和通信网络 4 个部分,见图 2.5-8。

1.2.5.1 保护测控单元（不仅限于此）

保护设备采用模块化软硬件，定值整定、特性选择、输入/输出配置和全部计算由软件实现。输入输出可扩展。保护与通信分别采用独立的 CPU 模块。

保护测控单元的性能指标如下：

- (1) CPU。采用 32 位的高性能微处理器。
- (2) 故障录波。记录 20 份故障录波数据，每份录波数据最长可达 28 个周。

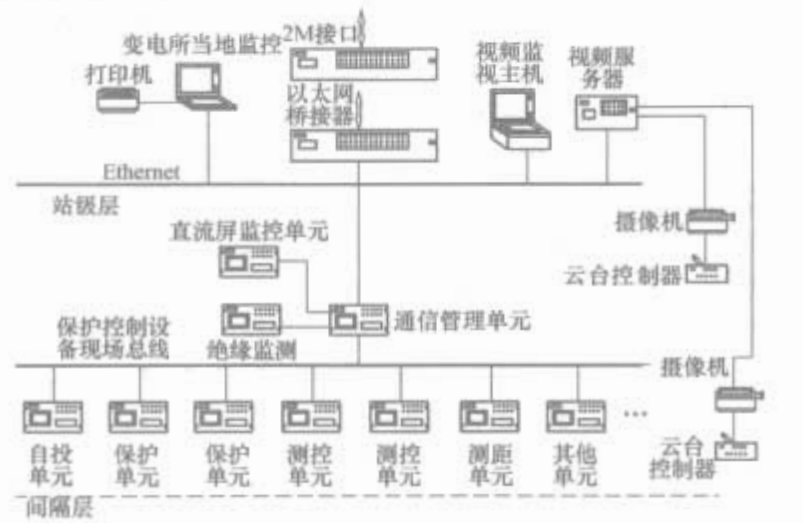


图 2.5-8 牵引变电所综合自动化方案图

- (3) 负荷录波。记录 18 个周的变压器高/低压侧负荷电流及电压波形。
- (4) 保护测控单元的主要保护、测控功能见表 2.5-6。

表 2.5-6 保护、测控功能配置

装置名称	主变压器保护、测控装置	馈线保护、测控装置	电容保护、测控装置
保护功能	差动速断保护	电流速断保护	电流速断保护
	二次谐波比率差动保护	过电流保护	过电流保护
	失压保护	三段式自适应距离保护	谐波闭锁的过电流保护
	高、低压侧过电流保护	谐波闭锁的过电流保护	差电流保护
	低压侧谐波闭锁、低压启动过电流保护	三段式高阻接地保护	低电压保护
	零序过电流保护、零序过电压保护	一次自动重合闸	过电压保护
	过负荷预告	馈线故障测距	差电压保护
	重瓦斯保护、轻瓦斯预告、过热信号	高次谐波抑制	
测控功能	110kV 三相电压、电流	母线电压、馈线电流	母线电压、支路电流
	110kV 有功功率、无功功率、有功电能、无功电能	有功功率、无功功率	
	27.5kV 侧电压和电流、牵引变压器油温、功率因数、频率		

这里要说明的是，馈线保护三段式具有自适应距离保护计算的特点。电铁馈线距离保护特性为四边形特性（图2.5-9早期为圆特性，灵敏度略差），动作边界是以纵轴为电抗 X 、横轴为电阻 R 、最大灵敏角为 ϕ 。按线路阻抗和负荷阻抗的大

小组成保护范围。对于采用交—直电力机车牵引的电气化铁路，重载线路时牵引重负荷与再生自动电流叠加和牵引重负荷与励磁涌流叠加都可能导致常规阻抗继电器保护的误动作，同时无论机车上是否有功率因数补偿装置，牵引网负荷电流中总是或多或少地存在谐波分量。因此，利用负荷电流中的综合谐波含量作为控制量，自适应地调节阻抗动作边界为

$$Z_{zd} = 1 / (1 + K_{235}) Z_{zd1}$$

式中： K_{235} 为综合谐波含量； Z_{zd1} 为常规阻抗继电器的动作边界。

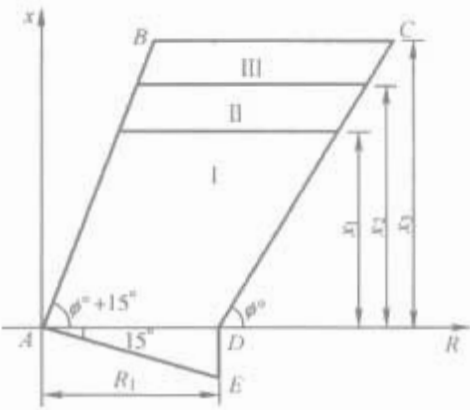


图 2.5-9 阻抗动作边界

1.2.5.2 当地监控单元

当地监控计算机采用工业控制用计算机，并通过网络适配器与计算机网络相连。当地监控单元具备有控制、测量及信号监视功能，提供数据管理报表及打印功能。

- (1) 实现对被控对象的控制操作。包括对某个对象的单独控制、对多个对象的程序控制。为了控制的安全性，控制分选择和执行两步进行，系统具有防止误操作及防止多重选择的措施，以及控制闭锁、试验遥控等辅助功能。
- (2) 实现对供电设备运行状态的实时监视和故障报警。
- (3) 实现对供电系统中主要运行参数的测量和统计，即数据采集功能。
- (4) 实现汉化的屏幕画面显示、上述运行信息和事件（故障、预告）信息的存储、打印。
- (5) 实现供电系统运行数据归档和报表统计、制表打印。
- (6) 对各种重要命令和操作设置超时监视。
- (7) 系统故障诊断功能。所内任何保护测控单元发生故障均报警，单个保护测量单元的故障不影响整个网络的运行。故障标志达到模块级。
- (8) 能实时查看每一个保护装置的故障报告、自检报告、事件报告和故障录波信息。
- (9) 能实现口令管理功能、网络对时和手动对时功能、模拟培训功能。

人机界面友好、使用方便，所有数据的建立、修改、画面的建立均无需编程，而是采用人机对话方式用专用工具直观编辑。

1.2.5.3 通信管理单元

通信管理单元是变电所综合自动化系统的重要组成部分，完成变电所内网和各种外部网络的互连，收集变电所内所有保护/测控/IED 装置的信息，使用各种标准通信规约以一对多的方式进行发送，并对各上位机下达的各种控制命令进行分析后发往对应的设备正确执行。

系统中采用两台通信管理机（冗余配置）。通信管理机硬件以高性能 32 位单片机配合大容量存储器为核心。基于 VRTX 多任务操作系统的通信管理软件具有较高系统吞吐量，具有事故、预告、音响功能。与牵引变电所内的保护和

测控单元通过 LonWorks 进行通信,同时与当地监控计算机和远方相连,构成当地变电所计算机监控系统和远方数据传输功能。

通信管理机配置如下(不限于此):2个10Mbit/s以太网口;2个总线接口,用光纤连接;2个异步串行通信接口,各自最高数据传输率均可达64kbit/s。

1.2.5.4 通信网络

为提高牵引变电所综合自动化系统的可靠性,牵引变电所综合自动化系统采用双层网络结构,通信管理单元与牵引变电所内的保护测控单元通过双环光纤网络在第一层环形网络上进行通信,在第二层通过以太网与当地监控计算机和远方相连,构成数据传输的功能。

通信规约应采用通用国际标准规约,支持多种标准网络通信协议,网络采用平衡传输方式,并向用户完全开放。

通信网络主要技术条件(不限于此)包括:①支持分层分布式控制,符合ISO相关国际标准;②通信媒质双环光纤网结构;③远动通道满足最高数据传输率64kbit/s,网络拓扑结构可为总线型;④视频监视通道满足2Mbit/s光纤口。当远动通道故障时,可临时征用视频通道,而视频主机置于“转发”模式。

1.2.5.5 电磁干扰及防护

牵引变电所是个复杂的电磁环境,存在设备操作时引起的含多种频率分量的衰减振荡波形成的脉冲电磁场干扰、所内地电位差干扰、裸导体产生的辐射干扰、电晕放电或高频电磁信号干扰、供电电源的干扰等。强电磁干扰通过不同的耦合途径,对计算机系统产生垃圾信息,特别是在所内采用的自动设备及综合自动化装置本身对电磁的敏感性,将影响系统的准确性。抑制干扰的措施很多,设备装置本身采取了隔离、屏蔽、平衡方式传输、接地性能和防磁能力措施、计算机总线措施、光导纤维通信方式等;在设计中采用屏蔽控制电缆、可靠的过电压保护、接地等电位联结、对二次回路采用静电屏蔽体、多模光纤作为传输线路等。通过这些措施,使牵引变电所内的电磁兼容水平在IEC等相关标准规定之内。

1.2.6 牵引供电远动调度系统

1.2.6.1 牵引供电远动调度系统范围

包括设置在控制中心的主站系统,设置在各变电所、开闭所、分区所、AT所、各车站负荷开关的综合自动化系统,以及由专用通信网络构成的数据传输通道,即电力监控(SCADA)系统由控制中心主站系统、变电所综合自动化系统及数据传输通道三部分构成。对供电设备的控制由控制中心远方控制、变电所集中控制、开关就地控制三级控制组成。

控制中心通过数据传输通道与各控制终端主监控单元进行信息交换,各控制终端的监控单元提供标准的、流行的工业现场总线、串行接口与各监控单元、微机型保护设备和各种自动装置进行信息交换,将各单元的实时信息和数据及时准确地传递给控制中心。

1.2.6.2 主站系统配置

铁路牵引控制中心采用开放型分布式计算机局域网,服务器/工作站模式,主从触点方式;网络采用高可靠的以太网,互为备用,并行工作方式,并采用高容错能力的“1+N”冗余工作模式;由局域网、主备服务器、操作员工作站、维护工作站、前置通信机、显示装置、打印机等外围设备构成。控制中心配置了直流电源及交流低压配电盘,保证监控设备的不间断供电。

(1)局域网采用双以太网,相互备用。一个网络用于控制中心电力监控计算机之间的通信;另一个网络处于热备用状态,当主用网络发生异常或故障时,系统在规定的时间内自动切换到备用网络。网络遵循CEI 60870标准的传输规约或IEEE 802.3标准;网络拓扑结构为总线型;网络通信协议采用TCP/IP;网络传输媒介为光纤。系统的网络具有良好的扩展性,客户机的增加不会影响网络性能。网络节点(运行系统相关软件的计算机)按功能和地域分布,能完全实现跨平台操作和异机种联网。系统的设计严格遵循开放的原则,任何硬件更新、功能增强和规模扩展都不会影响现有系统的基本结构和已实现的功能。

(2)监控主机。采用企业级服务器,管理整个系统的资源并为系统提供资源服务。监控主机采用双重配置,冗余结构互为热备用状态,故障时可自动切换到另一台备用服务器上,切换时间 $\leq 15\text{s}$,故障信息在打印机上打印,并在CRT系统故障画面上显示。2套主机通过网络适配器同时接收或发送网上数据,但仅在线主机具备数据流控制及管理功能。主、备后台处理机支持数据校验,以保证完整一致的数据库,同时提供对双机工作状态的在线监测。主机配有Windows 4.0或Windows NT操作系统和成熟的支撑软件平台,具有丰富的开发环境和强大的网络支持能力。能够充分地保障系统软件、支撑软件、应用软件的驻存以及日报、月报、操作记录、卡片内容等的海量存储要求及用户扩充的需要。此外,该机还能方便地进行I/O扩展和磁带机扩展,以满足软件开发及维护的需要。

(3)系统配置2套操作员工作站,用于调度人员的日常控制、监视和调度管理工作,进行供电设备和电力设备的监控及实时的数据监测,完成采集数据的归档、统计、报表、检索和维修建议等功能。

(4)维护工作站。用于生成、修改和管理系统实时数据库、历史数据库及用户画面,定义、修改系统运行参数、维护和开发系统程序等。同时,该工作站完成对系统运行状态的监视,并对重要工况参数进行实时打印。系统对数据库、用户画面和系统运行参数的修改、定义,可在线随时进行。修改时不会影响系统的正常运行。系统数据库、历史库及画面的修改均采用无需编程的人机对话方式。配置一套外挂式光盘刻录机,用于系统大量运行数据的归档、统计、报表、检索等内容的备份和保存。维护工作站配备一台彩色打印机用于各种维护打印。

(5)前置通信机。主要作为远动数据通道接口,完成数据的发送、接收及数据的预处理(简称为RCG)。在该系统中配置2套功能等价的前置通信机,实现相互之间的热备用。RCG配置有监视其工作状态的看门狗软件。

(6)设置系统时钟子系统。系统提供时钟子系统,并作为系统主时钟和同步计算机设备时钟。系统主时钟采用SGC-01同步时钟(GPS),步精度 $1\mu\text{s}$,走时精度 0.2ms ,接口能力为RS232C。

(7)主站系统软件(不限于此)。系统采用Windows 2000(Advanced)、Windows NT或Windows 4.0操作系统。主站应用软件的开发应以成熟的工业组态软件为平台;电力监控软件采用具有成熟的应用经验,软件应支持分布式网络、冗余配置、Server/Client方式、在线重启功能,支持OLE、OPC和ActiveX,开放式数据库的连接支持(ODBC)等先进的、标准的、开放的技术,使用户可以根据现场情况、功能要求等各种因素进行综合考虑,方便快捷地组成最适用和最可靠的应用系统,更好地将IT技术与本系统进行

结合，随组态软件的升级而升级，保证跟上计算机软件技术发展的潮流。同时软件应有很好的开放性，使在不同平台上建立的节点可以在同一个网络中互相连接配合运行。应用软件按模块化设计，具有高可靠性、安全性、灵活性、可扩展性。

1.2.6.3 系统主要功能

(1) 遥控功能。控制命令的发布、控制条件的检查、模拟盘操作等；支持“选择—返送校核—执行”的工作方式。

1) 单控。完成控制范围内的所有断路器、电动隔离开关的操作控制。

2) 程控。按预定的逻辑模式完成若干个断路器的倒闸作业。

所有设备应同时具备 3 种操作模式，包括手动操作、本机操作以及通过管理控制与数据采集系统进行遥控操作。系统具有控制闭锁功能，如断路器与电动隔离开关之间的相互闭锁、变电所高压进线开关与母联断路器之间的闭锁等。

(2) 遥信功能。断路器位置信号、当地/远方操作信息显示、牵引变电所牵引变压器调压开关位置信号、变电所事故、报警信号。

(3) 遥测功能。现场数据（电流、电压、功率、电能）的采集和工程量值转换，越限检查。

(4) 报警处理功能。包括报警条件的设定、报警的发布、确认等。

(5) 数据处理及统计报表。实时数据、历史数据的收集，实时及历史曲线的显示，历史统计资料的存储，历史统计报表的生成、打印等。

(6) 用户画面。包括各种单线图、曲线、图表等画面的显示。

(7) 自检和维护扩展功能。

(8) 安全管理功能。包括个人账户的建立、操作权限的检查、操作区域的划分、检查操作过程记录等。

(9) 系统组态。完成网络节点、路径、报警、安全等参数的设置功能。

(10) 培训功能。系统具有对操作人员、运行维护人员进行上岗培训功能，使其掌握电力监控（SCADA）系统的运行管理、操作以及日常维护、故障排除、替换故障元件等业务。

(11) 软件的维护、修改、扩展功能。系统具有对应用软件维护修改、容量扩展的功能，在系统进行维护、修改、扩展等功能时，不影响整个系统的正常运行。

(12) 系统具有容错能力、自诊断、自恢复及在线修改功能。

(13) 对各种重要命令和操作设置超时监视。

(14) 系统具有防止误操作功能。

1.2.6.4 远动数据通道

远动通信可根据被控站分布情况和系统技术要求，选择点对点或环型方式，采用半双弓方式。远动通道由铁路通信系统提供 2 路 64K 专用数字通道，采用光纤进所（也有采用实回线和载波线路）。通道接口可选用数字音频信号或数字基带信号，其指标见表 2.5-7。

表 2.5-7 通道接口指标（不限于此）

参 数	指 标
信息传输速度（baud）	≥1200
误码率	≤10 ⁻⁵
接收电平（dBm）	≥-40
发送电平（dBm）	0~-15

1.2.6.5 主要技术指标（不限于此）

远动调度系统主要技术指标如表 2.5-8 所示。

表 2.5-8 主要技术指标	
参 数	指 标
遥控响应时间（s）	≤3
遥信响应时间（s）	≤3
遥测精度（%）	≤±0.5
画面响应时间（s）	≤2
SOE（ms）	
站内	≤1
站间	≤10
控制中心网络通信速率（Mbit/s）	≥100
装置平均无故障工作时间（MTBF）（h）	≥10000
控制中心系统主机双机切换时间（s）	≥15
遥测变化响应时间（s）	≤3
遥控正确率（%）	≥99.99
遥信正确率（%）	≥99.9
系统可用率（%）	≥99.8

1.2.7 安全视频监控系统

铁路牵引供电安全视频监控系统，由监控中心、远程现场视频监控站、图像信号传输通道三部分构成。

1.2.7.1 监控中心的配置

监控中心内设有工业控制主机，用来处理视频信号、音频信号和数据信号。设有彩色显示器，用来对远端所、亭的视频信号进行监视，并设有报警装置、视频、音频和数据信号解码器，用来处理从 2Mbit/s 接口出来的数据流。如果监控中心附近只提供一个 2Mbit/s 接口，彩色显示器同时只能监视一个所的情况，由计算机自动切换。其主要设备包括监控管理和视频服务器、视频工作站、网络协议转换器、集线器、显示器、网卡和操作台以及视频监控管理系统应用软件。

1.2.7.2 远程现场（远程终端）的配置

牵引变电所/开闭所视频监控系统如图 2.5-10 所示。

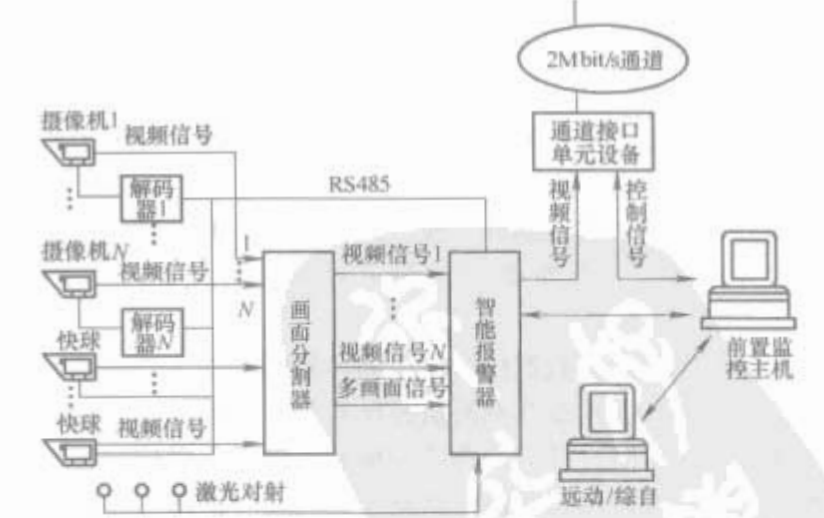


图 2.5-10 牵引变电所/开闭所视频监控系统

牵引变电所、开闭所、分区所作为系统的远程终端，其中监测信号主要是 CCD 摄像机输出的标准视频信号，从远程现场传输到监控中心；控制信号主要是现场定位以及 CCD 摄像机的位置调整、焦距调整等信号，从监控中心传输到远程现场；报警信号主要是将各种烟感、温度、湿度、玻璃破碎、门禁的 I/O 信号从远程现场传到监控中心，能够在电子地图上自动识别，同时可拨通报警电话。在现场与控

制中心之间可以传输双向音频信号，实现对话、监听功能。视频信号、音频信号、控制信号和报警信号通过现场所提供的标准的 EI (2Mbit/s) 通道，经过编码器进行传输。牵引变电所远程终端主要设备配置见表 2.5-9。

表 2.5-9 牵引变电所远程终端主要设备配置

设备名称	安装位置及用途	数 量
快球彩色摄像机	110kV 侧设备监视	按要求配置
固定彩色摄像机	27.5kV 侧馈线隔离开关监视	
带云台（或快球）彩色摄像机	27.5kV 侧馈线侧	
快球彩色摄像机	主控制室	
带云台（或快球）彩色摄像机	高压室	
带云台（或快球）彩色摄像机	电容室	
激光（或远红外）入侵探测器	围墙四周、大门	
警灯、警笛	院内明显位置	
视频监控主机	包括电源逆变器、音频视频卡等	
报警控制器		

1.2.7.3 传输网络的配置

利用铁路沿线铺设的通信网络，提供专用 2Mbit/s 通信通道。为减少传输损失，增强抗干扰能力，从远程终端光端机 2Mbit/s 接口传出的数据流到监控中心的计算机的通道优先考虑同轴电缆传输，也可以用带屏蔽的双绞线电缆连接。

1.2.7.4 系统功能

- (1) 可实现远端及本地快球和云台的自由转动。
- (2) 可实现对多个地点、多路图像的自由切换。在计算机多媒体界面上用鼠标操作设定，能够实现视频图像的时序切换、分组切换、关联切换、报警自动切换。
- (3) 可实现对图像的显示、冻结和缩放。
- (4) 可实现对图像的自由存放（硬盘录像）、回放及逐帧搜索画面。
- (5) 强大的报警联动功能。
- (6) 可实现视频报警功能，在探测范围内出现移动目标时，发出报警信号。
- (7) 具有防盗的功能，即在变电所被控站入口、主控室入口、高压室入口安装门禁传感器；在主控室的窗户上安装防碎传感器。
- (8) 具有防火、防烟、防潮功能，即在主控室安装温度、烟感、湿度传感器；在高压室安装温度、烟感传感器。
- (9) 具有对设备运行监视的功能，即在主控室内的控制盘前，安装全方位的 CCD 摄像机和云台；在高压室内，为了对一次侧进线和二次侧馈线断路器的电动隔离开关进行监视，可安装全天候黑白摄像机；在主控室内，计量表前安装 CCD 摄像机，达到用摄像机自动抄表的功能。
- (10) 视频防破坏报警功能。报警布防摄像机被遮挡时，能够产生无视频报警信号。
- (11) 报警信息存储、检索及处理功能。多媒体监视主机能对报警相关的视频、声音、报警时间进行有组织的存储，并能方便地分析、检索及增强、放大。
- (12) 多媒体技术。界面显示多层集成控制报警布防图，单画面/多画面分割图像；可同时显示 9 路实时视频图像；显示顺序切换的报警状态，用鼠标操作设置切换时间、顺

序、报警布防、撤防、报警输出、云台、镜头位置预置。系统主要技术参数见表 2.5-10。

表 2.5-10 系统技术参数（不仅限于此）

参 数	指 标
系统可用率（%）	>99
视频采用标准	PAL 或 NTSC 制式随意选择单画面、4 画面、9 画面、16 画面模式
视频压缩技术标准	MPEG-1、MPEG-2、MPEG-4、JPEG/M-JPEG
图像分辨率	≥720×576
图像传输帧速率(帧/s)	≥25
计算机显示分辨率	>800×600
系统时钟精度(s)	<1
各监控点之间的视频切换时间(s)	≤1
遥控命令传送时间(s)	≤1
系统平均维护时间(MTTR)(h)	<0.5
系统硬件平均无故障工作时间(MTBF)(h)	>100000h
系统平均无故障工作时间(MTBF)(h)	>20000
计算机 CPU 平均负荷率(%)	<30
硬盘录像(h·路)	1Gbytes 空间可连续录像>3
监控画面显示与实际事件发生时间差(s)	<0.5
事件报警到系统自动记录相应画面时间差(s)	<1
各报警探头报警到后台信息显示时间差(s)	<1
通道数据传输速率(Mbit/s)	2.048

1.2.7.5 在线监测设备

实现牵引变电所运行状态和电气设备绝缘综合在线监测，不仅是防止设备在运行中突发事故的有效措施，而且是状态检修的技术基础。利用在线监测技术对所监测的设备参数进行分析，可找出潜伏故障的可能，以便预测设备运行状况，了解其恢复力，做出相应的决策。

(1) 主要功能。包括以下功能：

- 1) 实时显示系统运行方式、设备二次侧倒送电情况；各断路器、隔离开关、熔断器的通断情况；各接地线的挂入与拆除情况。
- 2) 直接在动态主接线图上查阅有关设备和线路的运行电流和电压。
- 3) 在主接线图上查阅设备绝缘状态，例如介质损耗因数、油中气体值、泄漏电流等。
- 4) 自动诊断。对超过阈值的设备自动进行报警、登记、打印。
- 5) 采用拨号上网方式，利用 Web 技术，允许授权的多用户进行远程访问。

(2) 技术特点。有以下 4 个方面：

- 1) 运行状态、运行参数、绝缘特性综合监测，图形、色彩和数据表示，直观。

- 2) 监测、报警、查询、管理、打印报告等多种功能集于一体, 自动化程度高。
- 3) 具有远方遥测、遥信功能。
- 4) 变电所及被监测设备的结构、接线不需要改变, 施工方便, 运行安全。

(3) 主要技术指标 (不仅限于此)。可查阅以下主要技术指标:

1) 可在主接线图上查阅有关绝缘状态, 包括变压器套管的泄漏电流、介质损耗因数、等值电容、油中气体综合值、油的泄漏电流、油的实际运行温度、铁心泄漏电流; 断路器的绝缘拉杆泄漏电流、真空度、机械特性; 避雷器的泄漏电流; 隔离开关支柱的泄漏电流等。

2) 可在主接线图上查阅电流和电压的有效值, 3、5、7 次谐波分量。

3) 监测参数每 10s 取 1 次数据, 每天约 250 万个实时监测数据保留 3 天, 然后处理后保留; 建立不小于 2000 个管理文本; 系统设三级权限, 分别加密管理。

1.3 接触网

1.3.1 特点和要求

接触网是沿铁路沿线架设的特殊电力线路, 电力机车受电弓通过与之滑动摩擦接触而受流, 取得电能。在受电弓的动力作用下, 整个接触网有不同程度的位移和振动, 并与受电弓构成一个振动系统。其振动幅度和频率受到接触线高度、接触网弹性、吊弦长度及接触网自身结构和受电弓结构等的制约。再加上外界环境的影响, 使振动变得非常复杂。

为了保证有良好的供电, 对接触网结构有以下要求:

- 1) 接触线悬挂点高度应尽量相等。
- 2) 接触悬挂应有较均匀的弹性和良好的稳定性。
- 3) 接触网结构应力求轻巧简单, 做到标准化, 方便施工和运行维修。
- 4) 接触网零部件应标准化, 轻便, 耐腐蚀, 可靠性高。

1.3.2 悬挂类型和结构

1.3.2.1 悬挂类型

接触网悬挂类型分复链型悬挂、简单链型悬挂和弹性链型悬挂三种。弹性链型悬挂和简单链型悬挂的主要区别是在形式上有无弹性吊索 (即 Y 形吊弦)。

从技术性能和综合经济性上比较, 弹性链型悬挂具有较多优点, 而简单链型悬挂结构最简单, 且便于施工、易于维护。另外, 简单链型悬挂国内有较成熟的设计、施工和运营经验, 与其他两种悬挂方式相比, 更适合于我国国情。

接触网一般采用免维护铝合金大滑轮组, 桥上采用棘轮、弹簧或液压补偿装置, 在大型客站等有景观要求的场所, 宜采用弹簧补偿装置。坠砣补偿装置需设置限制架, 正线承力索及接触线的补偿装置变比采用 1:3 或 1:4; 区间中心锚结采用防断防窜方式, 站场中心锚结采用防窜不防断方式。

1.3.2.2 结构

(1) 导线高度及允许车辆装载高度。接触线距轨面的最低高度按带电通过超级超限货物列车 (装载高度为 5300mm) 考虑, 或按带电通过双层集装箱货物列车 (装载高度 5850mm) 设计。

接触线悬挂高度要保证接触线在最大正弧垂时, 不低于最低高度。接触导线最低高度 H_d 是根据允许的货物列车最大装载高度及接触网带电部分距最高装载货物的绝缘空气间隙确定的。

在最大负弧垂时, 不能高于最高高度。接触线最高高度

应保证受电弓抬高时, 仍不超过受电弓的最大允许工作高度。

接触线悬挂高度 H_j 计算公式为

$$H_d + f + \delta \leq H_j \leq H_g$$

式中: H_d 为接触线最低高度; f 为跨中弧垂; δ 为接触导线高度施工偏差; H_g 为受电弓的最大允许工作高度。

根据目前的设计情况, 在时速 200km 情况下开行超级超限货物列车的接触线高度详见表 2.5-11, 开行双层集装箱货物列车的接触线高度详见表 2.5-12。

表 2.5-11 接触线高度 (开行超级超限货物列车)

安装地点	导线最低高度 (mm)	接触线悬挂点高度 (mm)
一般车站、区间、联络线等	5700	6000
有调机作业的大站	6200	6450
隧道	5700	5750~6000

表 2.5-12 接触线高度 (开行双层集装箱货物列车)

安装地点	导线最低高度 (mm)	接触线悬挂点高度 (mm)
区间、站等	≥ 6330	6400~6450
隧道	≥ 6330	6400~6450

(2) 结构高度的确定应能满足对最短吊弦的要求。新建接触网结构高度一般为 1400~1600mm, 与隧道、跨线建筑物相邻的支柱, 其结构高度根据具体情况适当降低, 以保证承力索对隧道拱顶或跨线建筑物的绝缘距离。

根据线路情况, 区间和站场正线最短吊弦长度不宜小于 500mm 或 600mm; 隧道内最短吊弦长度不宜小于 400mm 或 500mm。

改建接触网与既有接触网保持一致。

(3) 隧道内外接触网高度的配合。隧道外第 1 根支柱距隧道口距离大于 35m 的地段, 其第 1 根支柱按降低结构高度 300mm 安装腕臂; 隧道外第 1 根支柱距隧道口距离小于 35m 的地段, 其第 1、2 根支柱分别按降低结构高度 400、200mm 安装腕臂。

在隧道口外两根支柱的回流线肩架适当降低安装高度, 以便与隧道内回流线安装高度匹配。

两隧道口间距小于 200m 的区段, 其隧道外支柱上导线的悬挂高度与隧道内相同。

1.3.3 接触网的导线和零部件

1.3.3.1 接触网的导线

接触线是接触网的主要组成部分。接触线的材质、工艺及性能对接触网起着重要的作用, 要求它具有较小的电阻率、较大的导电能力; 要有良好的抗磨损性能, 具有较长的使用寿命; 要有高强度的机械性, 具有较强的抗张能力等。

在我国曾采用过多种接触线, 有铜接触线, 钢铝复合新型接触线, 内包钢的 GLCN 型钢铝电车线, 连铸连轧、无焊接接头的 TCW-110 型、TCW-85 型接触线及铜银、铜锡、铜镁合金接触线。

接触网选用的线材可参考表 2.5-13。

表 2.5-13 接触网线材表 (不仅限于此)

参 数	承 力 索		供电线/回流线	架空地线	正 线	站 线
规 格	JTMH-95	JTMH-70	LZGJ-185	LZGJ-50	CTAH-120	CT-85/CTAH-85
拉断力 (kN)	54.76	38.64	40.88	42.62	42.35	31.82
额定张力 (kN)	14.7	14.7	11.76/9.8	9.8	14.7	8.33/10

1.3.3.2 零部件

(1) 绝缘子。绝缘子一般采用瓷质绝缘子，隧道内悬挂安装及电分段绝缘器处承力索绝缘子串、绝缘锚段关节、下锚等特殊地方可采用硅橡胶合成绝缘子。

1) 腕臂棒式绝缘子。棒式绝缘子的主要技术性能及规格应满足 GB 11030《交流牵引线路用棒形瓷绝缘子》及 TB/T 2076《电气化铁道接触网用棒形瓷绝缘子》的技术要求。它的规格和主要机电性能见表 2.5-14 和表 2.5-15。

表 2.5-14 棒式绝缘子规格 (不限于此)

参 数	2°斜腕臂用耐污型棒式绝缘子	2°平腕臂用耐污型棒式绝缘子	2°斜腕臂用双重绝缘耐污型棒式绝缘子	2°平腕臂用双重绝缘耐污型棒式绝缘子
D(mm)	185	185	185	185
d(mm)	62	61.5	62	61.5
H(mm)	760	785	850	875
额定电压(kV)	25	25	25	25
标称泄漏距离(mm)	1200	1200	1200/145	1200/145
结构图	图 2.5-11	图 2.5-13	图 2.5-12	图 2.5-14

注 表中标称泄漏距离的分子表示主绝缘侧，分母表示附加绝缘侧。

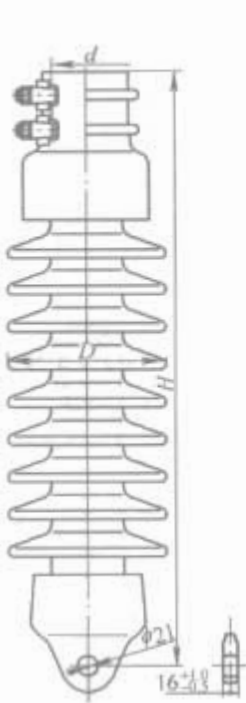


图 2.5-11

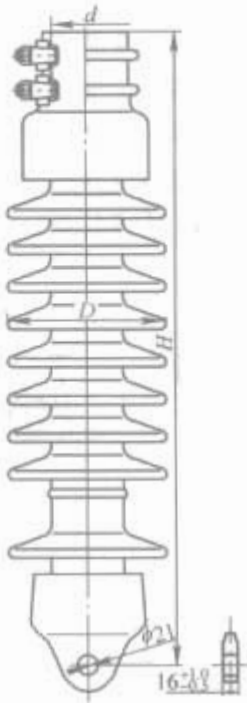


图 2.5-12

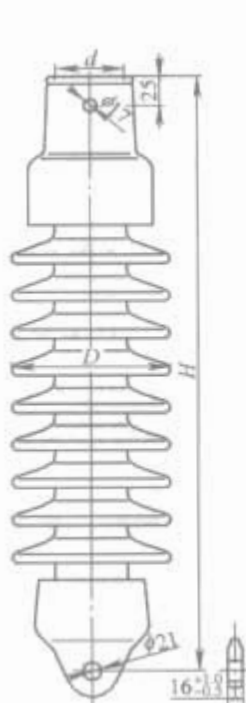


图 2.5-13

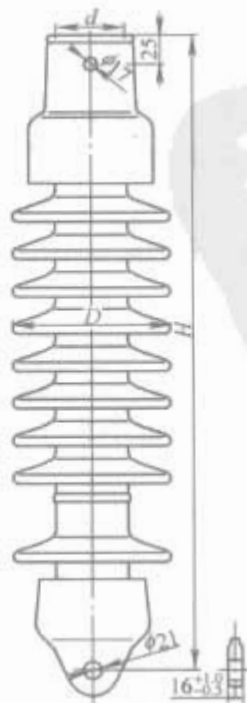


图 2.5-14

与斜腕臂相连的绝缘子钢帽 (图 2.5-11、图 2.5-12) 配用压板、U 形抱箍、螺母、弹簧垫圈以保证绝缘子与腕臂间配合压紧，并保证腕臂与钢帽间滑动荷重不小于 40kN。压板具体尺寸见图 2.5-15。

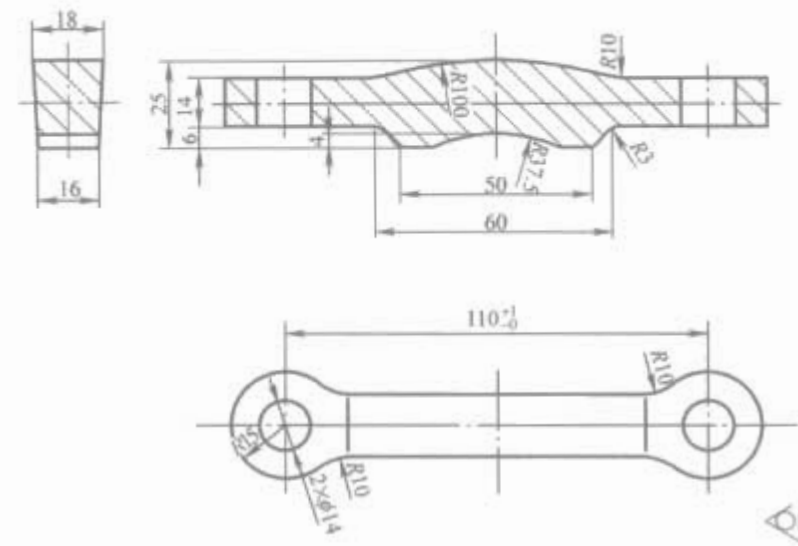


图 2.5-15 压板尺寸

与平腕臂相连的棒式绝缘子 (图 2.5-13、图 2.5-14) 的钢帽采用带孔螺栓销、螺母、开口销连接。保证腕臂与钢帽间滑动荷重不小于 40kN。

表 2.5-15 棒式绝缘子主要机电性能表 (不限于此)

参 数	耐污型	双重绝缘耐污型	
		主绝缘侧	附加绝缘侧
工频干耐受电压(有效值)(kV)	≥160	≥160	≥30
工频湿耐受电压(有效值)(kV)	≥130	≥130	≥23
雷电全波冲击耐受电压(峰值)(kV)	≥270	≥270	≥50
污秽耐受电压(有效值)(kV) (在 0.35mg/cm² 盐密度下)	≥32	≥32	
抗弯破坏负荷(kN)	12	12	
抗拉破坏负荷(kN)	120	120	
额定滑动负荷(kN)	40	40	

2) 悬式绝缘子。悬式绝缘子主要技术性能及规格应满足 GB 1001《盘形悬式绝缘子技术条件》及 GB 4056《高压线路悬式绝缘子联结结构尺寸》的技术要求。它的规格和主要机电性能见表 2.5-16 和表 2.5-17。

表 2.5-16 悬式绝缘子规格 (不限于此)

参 数	A 型耐污耳环悬式绝缘子	B 型耐污杵头悬式绝缘子
类 型	70T	70
D (mm)	255	255
H (mm)	146	146
d (mm)		16
φ (mm)	19	
b (mm)	13	
结构图	图 2.5-16	图 2.5-17

表 2.5-17 悬式绝缘子主要机电性能 (不限于此)

参 数	A 型	B 型
工频干耐受电压 (有效值) (kV)	≥85	≥85
工频湿耐受电压 (有效值) (kV)	≥45	≥45
工频击穿电压 (有效值) (kV)	≥120	≥120
50%全波冲击闪络电压 (峰值) (kV)	≥120	≥120
抗拉破坏荷重 (kN)	70	70
爬电距离 (mm)	400	400

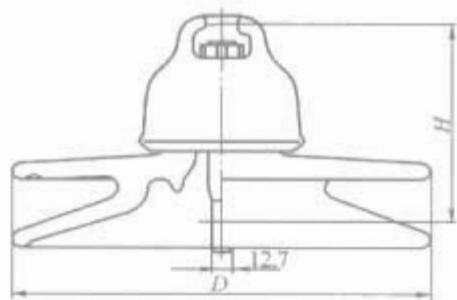


图 2.5-16 70T 型耐污耳环悬式绝缘子

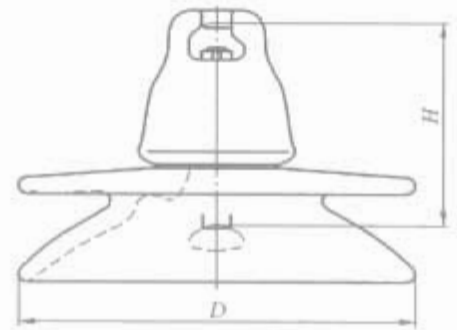


图 2.5-17 70 型耐污杆头悬式绝缘子

3) 复合绝缘子。复合绝缘子主要技术性能及规格应满足 JB 5892《高压线路用有机复合绝缘子技术条件》及 TB/T 3068《电气化铁道接触网用棒形悬式复合绝缘子技术要求》。它的主要机电性能见表 2.5-18。

表 2.5-18 复合绝缘子的主要机电性能 (不限于此)

参 数	耐污型
工频干耐受电压(有效值)(kV)	≥160
工频湿耐受电压(有效值)(kV)	≥130
雷电全波冲击耐受电压(峰值)(kV)	≥270
污秽耐受电压(有效值)(kV) (在 0.35mg/cm ² 盐密下)	≥32
抗拉破坏负荷(kN)	120

(2) 接触网金具选用。随着电气化铁路运行速度的不断提高, 各种零部件更加突出地显现出它的重要程度, 高速铁路要有良好的受流, 接触网金具应选用高强度、防腐性能好、加工相对简单的结构及材质, 适应接触网的大张力并伴随长期的低频振动的工作条件, 保证行车安全, 减少维护工作量。

1) 组合定位装置。组合定位装置 (图 2.5-18) 是接触线的定位部件, 用于单相 25kV、50Hz 交流电气化铁路全补偿链型悬挂接触网中铜合金接触线的定位。

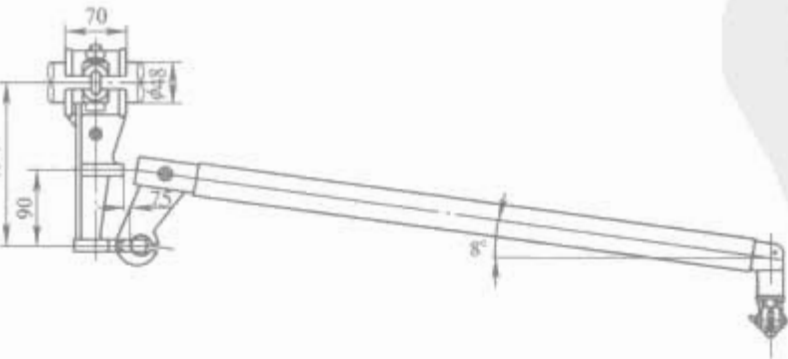


图 2.5-18 组合定位装置

对组合定位装置各个部件的要求是: ①强度高; ②质量小, 不要在定位点处形成明显硬点; ③耐腐蚀性能好, 不产生锈蚀, 使用寿命长; ④灵活性好, 能够良好地上下抬升及左右偏移; ⑤稳定性好, 在风作用及受电弓通过时不产生过

大摆动及跳动; ⑥结构简单, 安装方便。
组合定位装置含定位器、定位器支座、防风拉线、定位线夹等。
定位器的性能应达到 (数据仅供参考): 最大工作荷重 2.5kN, 抗拉伸荷重 3.7kN, 耐压缩荷重 2.5kN, 最小破坏荷重应不小于 7.5kN。
定位器支座的性能应达到 (数据仅供参考): 最大水平工作荷重为 2.5kN; 滑动荷重应不小于 4.9kN; 水平破坏荷重应不小于 7.5kN。
2) 定位线夹。接触线定位线夹 (图 2.5-19) 起夹持接触线的作用, 适用于标称截面积为 120mm²、85mm² 等铜合金接触线, 它和定位器一起组成定位装置。

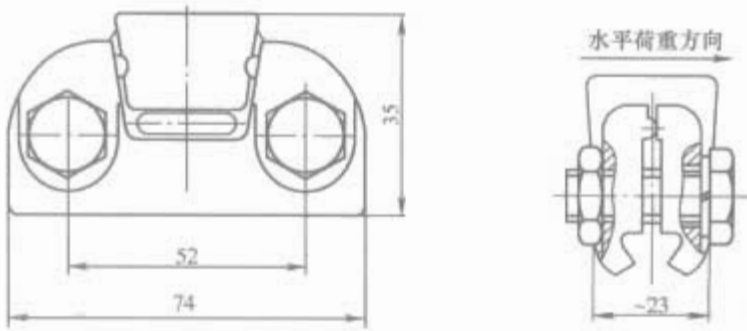


图 2.5-19 定位线夹

定位线夹的性能应达到 (数据仅供参考): 最大水平工作荷重为 2.5kN; 滑动荷重应不小于 1.5kN; 水平破坏荷重应不小于 7.5kN; 螺栓紧固力矩为 25~32N·m。
3) 接触线中心锚结线夹。用于标称截面积为 120mm² 等的铜合金接触线与 95mm² 等的铜合金绞线中心锚结绳锚固, 见图 2.5-20。

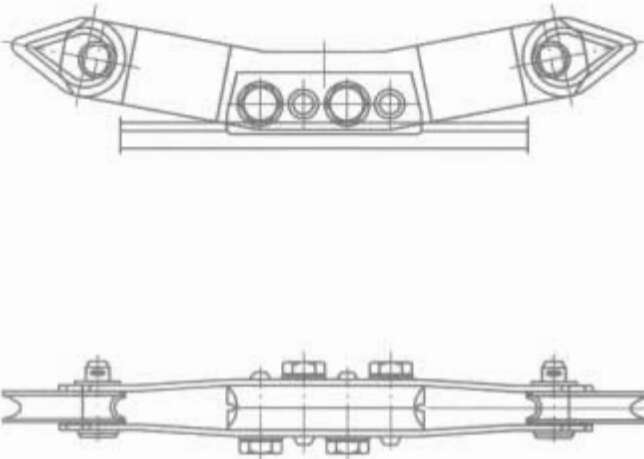


图 2.5-20 中心锚结绳锚固

这种线夹分为正线接触线中心锚结线夹和站线接触线中心锚结线夹。其机械性能要求如下:
正线接触线中心锚结线夹与接触线间的最大工作荷重不小于 16.5kN, 与接触线间的滑动荷重不小于 24.75kN, 与锚结绳间的滑动荷重不小于 24.75kN, 线夹螺栓的紧固力矩为 44N·m。
站线接触线中心锚结线夹与接触线间的最大工作荷重不小于 11kN, 与接触线间的滑动荷重不小于 16.5kN, 与锚结绳间的滑动荷重不小于 16.5kN, 线夹螺栓的紧固力矩为 44N·m。
4) 下锚补偿装置。补偿装置调节接触线、承力索因温度变化以及其他原因形成的弹性伸长及蠕变伸长, 使张力达到恒定或基本恒定。如遂渝线上采用了铝合金滑轮补偿装置、棘轮补偿装置、液压补偿装置和鼓轮补偿装置 4 种下锚装置, 一般情况如下:
a. 铝合金滑轮补偿装置 (图 2.5-21)。它包括不同轮径

的滑轮、滑轮组框架、坠砣杆、坠砣限制架、补偿绳、补偿绳用楔形线夹、补偿绳与坠砣连接处金具、滑轮组与双环杆连接处金具及滑轮组与导线连接处的各种金具件。滑轮组框架的两端与其他零件的连接处应为双耳结构，双耳间距为 20mm，并佩带 M20 的防腐螺栓。

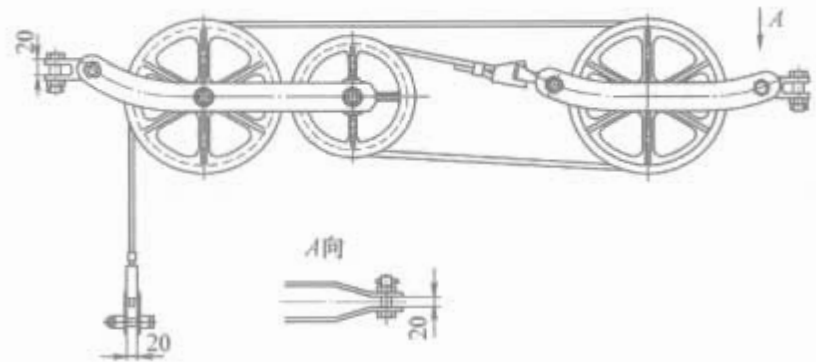


图 2.5-21 铝合金滑轮补偿装置

铝合金滑轮补偿装置质量小、强度高、耐腐蚀性能好。由于其补偿滑轮采用固体润滑及无滚动轴承的无油润滑免维护滑轮，因此减少了维修工作。

b. 棘轮补偿装置（图 2.5-22）。它主要由棘轮轮体、楔子、棘轮轴、棘轮支架、棘轮连接架、补偿绳及平衡轮等组成。

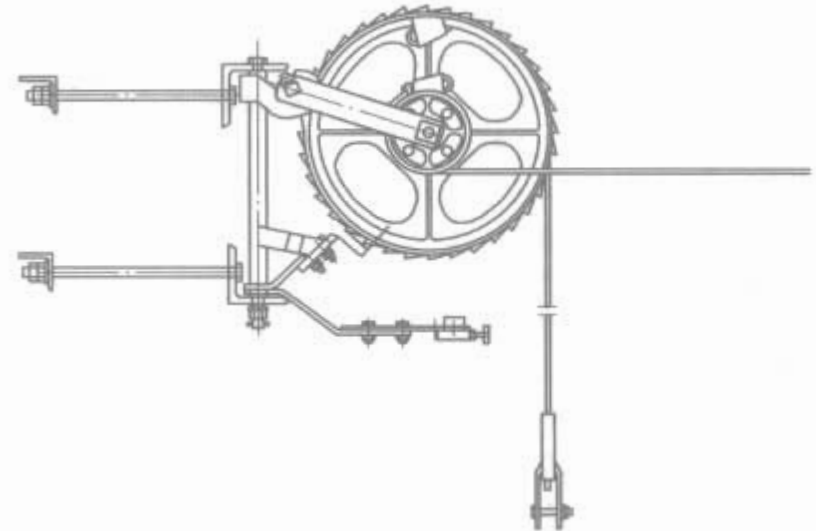


图 2.5-22 棘轮补偿装置

棘轮补偿装置具有断线制动功能，当接触线或承力索发生断线时，棘轮因绳索张力与锤砣质量间失去平衡而快速下落，制动器将卡住棘轮边沿上的齿槽，使棘轮不下落，既避免事故扩大，又能较容易恢复工作，并且其安装空间较小。

c. 液压补偿装置。如图 2.5-23 所示，液压补偿装置由一个单作用的油缸通过油管与一个气囊式蓄能器连通，组成一个封闭的独立液压系统。当温度变化时，张力保持恒定，气囊内的气体发生热胀冷缩，推动油缸收缩或伸出，从而达到补偿的作用。

接触网液压张力补偿器，是替代传统的坠砣方式，实现电气化铁道承力索和接触线自动张力补偿的一种新装置。它

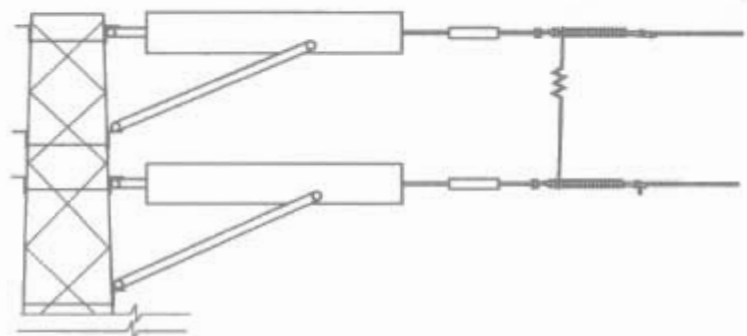


图 2.5-23 液压补偿装置

结构简单、体积和质量小，安装方便。

根据目前铁路发展情况，在桥上等处还采用了弹簧补偿装置。

5) 吊弦。为了增加承力索的导流作用，吊弦不仅起着悬吊接触线，并把接触线固定到设计高度的作用，而且还起着并联线的分流作用。因此采用可调式整体吊弦，一般正线采用载流型（图 2.5-24，规格不仅限于此），站线采用非载流型（图 2.5-25，规格不仅限于此）。

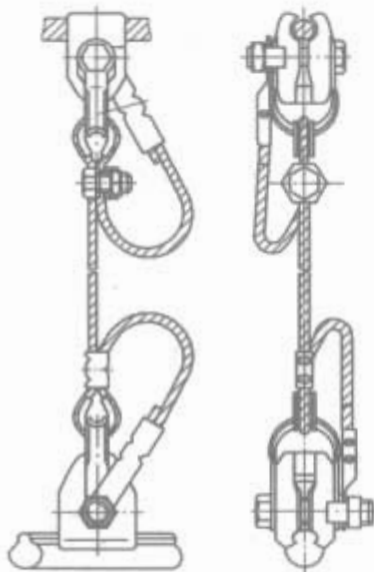


图 2.5-24 整体吊弦
可调载流型

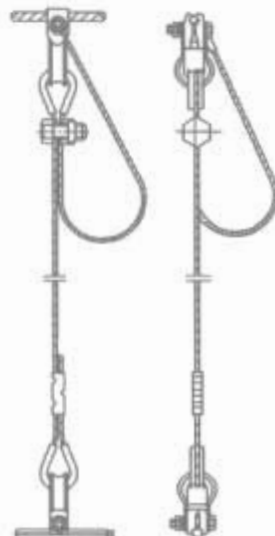


图 2.5-25 整体吊弦
可调非载流型

6) 电连接线夹（图 2.5-26）。该零件用于电气化铁路全补偿链型悬挂接触网中接触线、承力索横向、股道、道岔等处的电连接。要保证接触网各导线之间及各股道接触悬挂之间有良好的电流通道，就需要使线夹与导线间接触电阻小、导电性能好。

接触线电连接线夹一端固定在铜合金接触线上，另一端与铜绞线压接固定。

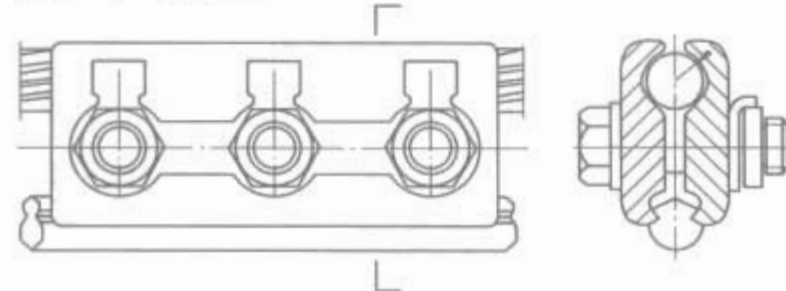


图 2.5-26 电连接线夹

承力索电连接线夹用于截面积为 70mm² 或 95mm² 等的青铜绞线与 95mm² 等的铜绞线间的并沟电连接。

并沟电连接线夹用于 2 根截面积 95mm² 等的铜绞线间的并沟电连接。

7) 线岔（图 2.5-27）。适用于道岔上方 2 支接触悬挂交叉处固定 2 条接触线。线岔由限制管、连接双耳、方头螺栓、定位线夹等组成。它直接影响着高速受电弓的运行安全，是高速接触网设计和安装中需要特别解决好的环节。

高速接触网线岔一般有交叉式和无交叉式两种形式。在时速 200km 的线路上可采用交叉式线岔安装，正线的道岔支柱位于道岔两线间距约 300mm 处。线岔交点距道岔定位

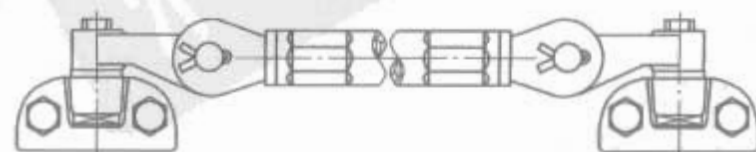


图 2.5-27 线岔

点的距离应尽可能大于 2500mm。

8) 在接触网带电范围绝缘子内的金具螺栓上,有些零件上需要增加止动垫片,以防止螺母的松动,保证线路运行安全。这些零件包括:定位线夹、套管双耳、承力索座、定位环、吊弦线夹、定位管卡子、承力索电连接线夹、接触线电连接线夹、承力索中心锚结线夹、接触线中心锚结线夹、 $\Phi 48\text{mm}$ 型电连接线卡箍等。

1.3.4 绝缘与供电分级

1.3.4.1 绝缘距离

根据接触网绝缘污秽等级标准(执行 TB/T2007),最小泄漏比距为 4.15cm/kV 。主绝缘子泄漏距离不小于 1200mm ;副绝缘子泄漏距离不小于 140mm ;上、下行正线间分段绝缘子串的泄漏距离按 1600mm 考虑;隧道内适当加强绝缘,绝缘子泄漏距离不小于 1400mm 。

接触网的空气绝缘间隙执行 TB 10009—2005《铁路电力牵引供电设计规范》、《接触网运行检修规程》和《铁路技术管理规程》及《铁路电力牵引供电隧道内接触网设计规范》等相关规定。表 2.5-19 规定了接触网的空气绝缘间隙。

表 2.5-19 接触网空气绝缘间隙值

适用情况	正常值 (mm)
25kV 带电体距固定接地体的间隙	300
25kV 带电体距机车车辆或装载货物的间隙	350
受电弓振动至极限位置和导线被抬起的最高位置距接地体的瞬时间隙	200
合成绝缘元件接地侧裙边距接地体间隙	50
瓷及钢化玻璃绝缘子接地侧裙边距接地体间隙	100
25kV 带电体距跨线建筑物底部的静态间隙	500

1.3.4.2 供电分段

(1) 电分相的设置。在变电所、分区所所在处设置电分相。电分相在不同相位的两段接触网之间,用隔离开关与带电端接触网相联络,有器件式和关节式两种。目前电分相采

表 2.5-20 各国接触网状态参数(不仅限于此)比较

国家	接触线类型	运行速度 (km/h)	线密度 (kg/m)	接触线张力 (kN)	波动传播速度 (km/h)	β
法国	SnCu120	350	1.07	24	539	0.65
德国	MgCu120	330	1.08	27	569	0.58
中国	CTAH-120	200	1.082	14.7	419	0.477
中国	CTAH-120	250	1.082	15	423	0.59
中国	CTS-120	250	1.082	20	489	0.511

1.3.5.2 弓网间接触力

接触网与受电弓的动态接触力与接触网的悬挂特性、线路状态、运行速度等有关。接触压力过小会造成离线,产生电弧或引起电流中断,滑板和接触线易烧坏;而接触压力过大,弓线之间的摩擦力也增大,这样就要增加导线和受电弓滑板的局部磨损,同时压力过大会使受电弓在定位零件等处受到损坏或者使接触网断线。因此要确定合适的最小接触压力和最大接触压力,使弓线之间的接触电阻小,磨损小,而且又不使导线产生危险的偏离。从目前国内外的分析看,在取流过程中,受电弓与接触线之间的动态接触力往往成为衡量受流品质的标准。动态接触压力主要通过接触力的最大值、最小值及标准偏差来评价。

单弓运行时,一般最大接触压力 F_{max} 小于 200N ,最小接触压力 F_{min} 大于 40N ,接触压力标准偏差 δ 小于 24N 。

用锚段关节结构的车载自动过分相形式,自动过分相装置包括三部分:

1) 地面感应装置,安装在电分相区域中的相应位置,为电力机车进行断电过电分相提供准确的位置信息。

2) 车上感应接收装置,安装在电力机车上,用于感应接收地面的感应信息。

3) 信号处理装置,完成信号处理、降电流、分断主断路器、过分相重合闸等功能。

(2) 锚段关节的设置。原则上一般站仅在来电端设绝缘锚段关节;变电所所在站在分相侧设绝缘锚段关节;困难区段个别车站可在另一端设置绝缘锚段关节;供电臂末端相邻的左右两站两端均需设置绝缘锚段关节,在长大隧道两端或中间设置绝缘锚段关节。

(3) 电分段的设置。上、下行渡线采用带消弧功能分段绝缘器实现电分段,使上、下行接触网从电气上分开。上、下行接触网带电体间的距离不小于 2000mm 。

(4) 枢纽站各独立电化车场按单独分段设计。

(5) 动车段、所应单独设计供电分段。

1.3.5 接触网与受电弓的配合

接触网和受电弓共同组成的受流系统的受流品质既取决于受电弓的参数,又取决于网的参数,两参数应合理匹配,才能实现高品质的取流,从而确保列车高速运行。受流品质是高速电气化铁路需要解决的最关键的问题,主要是对影响受流品质的波动传播速度、接触力和接触线的动态高差、接触线动态抬升量、静态特性等因素进行分析。因此接触网悬挂系统的选择,应保证在车速变化等各种恶劣条件下正常取流,以提高运行可靠性。

1.3.5.1 接触线的波动传播速度

接触线的波动传播速度是受电弓沿接触线高速滑动时,引起接触线的上、下振动的横波。而无量纲系数 β 值是最高运营速度与接触线的波动传播速度的比值。当 β 小于 0.7 时,可获得较满意的受流质量, β 越小,受流质量越好。当列车运行速度超过接触网传播速度的 0.85 倍时,受流质量会急剧恶化。各国接触网状态参数比较见表 2.5-20。

1.3.5.3 接触线的动态抬升量

接触线动态抬升量与受电弓的抬升力有关。接触线在受电弓抬升力作用下所具有的升高性能即是弹性。在接触网和受电弓系统中,接触线平均抬高量越大,越容易疲劳且接触网稳定性越差;弹性越小,受流品质越好。

1.3.5.4 接触网的静态特性

接触网静态弹性为在接触网静止状态下对接触线由下向上施加垂直力,接触线的抬高值与垂直力之比,即 $E=\Delta h/P(\text{mm/N})$;静态弹性差异系数 $\mu=(E_{\text{max}}-E_{\text{min}})/(E_{\text{max}}+E_{\text{min}})$ 。在简单链型悬挂时, $\mu<30\%$ 。

1.3.6 高速接触网

1.3.6.1 接触网导线及张力选择

(1) 接触线线材及张力选择。接触线线材及张力是高速接触网设计的关键。为了达到高速时的良好受流质量,接触

线张力应尽可能大。

受电弓沿接触线高速滑动时，引起接触线的上、下振动的横波，当列车运行速度超过接触网传播速度的 0.7（即 β 值）倍时，受流品质会急剧恶劣，所以受流品质取决于波动传播速度 V_j ，足够大的接触线张力可以保证高速受流。接触线的波动传播速度的计算式为

$$V_j = 3.6 \sqrt{T/\rho} \tag{2.5-43}$$

式中： T 为接触线的张力，N； ρ 为接触线的密度，kg/m。

无量纲值 β 是最高运营速度与接触线的波动传播速度的比值，要求 $\beta \leq 0.7$ 。 V_j 和 β 是影响运行速度的关键，在接触网确定后， β 越小弓网关系越好，离线越少，适应能力越强。

表 2.5-21 接触网参数分析表

运行速度 (km/h)	接触线 张力(N)	承力索 张力(N)	接触线 密度 (kg/m)	承力索 密度 (kg/m)	波动传播 速度 (km/h)	反射因数	多普勒系数	增强因数 <3.0	$\beta < 0.7$
200	14700	14700	1.082	0.845	419.612	0.469	0.354	1.324	0.477
200	12740	14700	1.082	0.845	390.637	0.487	0.323	1.509	0.512
200	15000	15000	1.082	0.845	423.872	0.469	0.359	1.307	0.472

从以上计算可知：

- 1) 当接触导线设计采用了 12740N 的张力，产生的波动传播速度为 391km/h。
- 2) 当接触线的张力为 14700N 时，波动传播速度升至 420km/h，同时多普勒系数也相应增加，反射系数由 0.487 下降至 0.469，因而，增强因数也由 1.509 降至 1.324。
- 3) β 是影响运行速度的关键，越小，弓网关系越好，离线越少，适应受电弓能力越强。当列车运营速度超过接触网传播速度的 0.85 倍时，受流品质会急剧恶劣。

因此采用较大的接触线张力，可以有效地降低接触网的增强因素，加大波动传播速度，提高列车运行速度，改善接触网的受流性能，增强接触网稳定性。所以在设计高速度的接触网时，增大接触线张力是改善接触网特性的一个强有力的措施。

但是接触线张力选用受导线的拉断力及其安全系数等影响。目前铁路电力牵引供电设计规范规定铜或铜合金接触线的安全系数为

$$K_j = F_{\max} a_1 / Fa_2 \tag{2.5-46}$$

式中： K_j 为安全系数； F_{\max} 为导线最大破坏拉力； F 为导线额定张力； a_1 为磨损系数； a_2 为张力差系数。

表 2.5-22 为接触网安全系数表。安全系数的选用直接关系到接触线最大允许张力的选用。德国 Re330 接触网系统 CuMg-120 张力用到 27kN，西班牙马德里至巴塞罗那线（时速 350km/h）接触网系统 CuMg-150 张力用到 31.5kN。随着世界高速铁路的发展、各国间的交流与合作及国内外的运行实践，为使接触线使用张力及波动传播速度提高，满足受电弓的更可靠受流，选择更适合我国高速接触线的安全系数是必要的。铜合金接触线以其导电性能好、强度高、耐高温性能好、耐磨耗等方面等被国内外广泛采用。另外，因接触线允许工作应力不应超过其最小拉断应力的 65%，并考虑接触线允许工作温度、接触线最大磨损等因素的影响，根据我国实际情况，安全系数标准就高不就低。由表 2.5-22 可知：铜合金接触线的安全系数也是满足要求的。

(2) 承力索导线选择。承力索是接触网承载接触导线并传输电流的线材。承力索的选用要考虑其线膨胀系数与接触导线相匹配；机械强度高；耐疲劳和耐腐蚀性能好、耐温特性好；电导率高等。铜合金绞线目前已受到各国的广泛认

反射因数 γ 为承力索线密度与张力积的开方除以承力索线密度与张力积的开方与接触线线密度与张力积的开方的和。

$$\text{多普勒系数 } a = (V_j - V) / (V_j + V) \tag{2.5-44}$$

$$\text{增强因数 } r = \gamma / a \tag{2.5-45}$$

在反射因数、多普勒系数、增强因数 3 项动态标准中，最关键的是增强因数。增强因数应尽可能减小，这可以增大多普勒系数或减小反射因数来实现。减小承力索的张力可以减小反射因数；但是，受结构高度等因素的限制，张力不可能减少，因此只有增加接触线张力和波动传播速度才能大幅度减少增强因数。表 2.5-21 为接触网参数。

表 2.5-22 接触网安全系数（不仅限于此）

线材 用途	型号	名称	使用张力 (kN)	安全系数
接触线	CTAH-120	铜银合金接触线	14.7	2.095
	CTAH-120	铜银合金接触线	15	2.053
	CTMH-120	铜镁合金接触线	20	2.127
	CTS-120	铜锡合金接触线	20	2.095
	CTHM-150	铜镁合金接触线	25	2.095
	CT-110	铜合金接触线	9.8	2.965
	CT-85	铜合金接触线	8.33	2.657
承力索	JTMH-70(19)	铜镁合金绞线	14.7	2.390
	JTMH-95(19)	铜镁合金绞线	14.7	3.387
	JTMH-95(19)	铜镁合金绞线	15	3.319
	JTMH-120(19)	铜镁合金绞线	20	3.071
	TJ(TYT)-95(19)	硬铜绞线	15	2.296
	LBGLJ-120/35(8/7)	铝包钢芯铝绞线	17	3.054
	LBGJ-70(19)	铝包钢绞线	15	4.583
	GTJ-80(19)/25	铜包钢芯铜绞线	17	3.316
	GTJ-70	铜包钢绞线	15	3.818

同，它具有强度高，高温耐软化性能好，耐腐蚀能力强，同时与铜合金接触线具有相同的线膨胀系数，不会产生吊弦偏移。受接触网稳定性、载流量、结构高度、支柱容量等因素影响，提高承力索的张力可以增加接触网的稳定性，但对弓网受流性能影响不大。承力索的张力受接触网的结构高度的限制，在一定的结构高度上，要满足跨距内最短吊弦的长度要求。

根据接触网载流要求，承力索可选用铜合金绞线 JTMH-120 等。

(3) 接触网悬挂组合方案及张力比选。接触网悬挂组合方案及相应动态参数见表 2.5-23。

(4) 国外 300km/h 及以上接触网悬挂动态参数见表 2.5-24。

综合各种组合的仿真数据及接触网稳定性及弹性方面的要求，借鉴国外接触网的悬挂参数，并考虑预留接触网匹配速度的发展空间，建议：300km/h 正线接触网选用 JTMH-95（20kN）+CuMg-150（25kN）或 JTMH-120（23kN）+CuMg-150（28.5kN）的悬挂组合；250km/h 正线接触网选用 JTMH-95（15kN）+CTS-120（20kN）或 JTMH-120（15kN）+CTS-150（20kN）的悬挂组合。

同的外轨超高,采用正定位斜腕臂安装方式或反定位平腕臂安装方式。

1.3.6.4 高速铁路电气化工程综合考虑的问题

(1) 支柱侧面限界。支柱侧面限界的确定已不仅是普通铁路以满足货物运输限界要求为标准,其同时还必须考虑轨道大型养路机械作业的需要、贯通电缆沟在路基上设置的位置等因素,根据相关规范要求,区间接触网支柱侧面限界一般大于或等于 3.0m。

(2) 桥梁上支柱基础。高速铁路桥梁主要有钢混结合梁、斜拉桥和系杆拱桥三种形式,从结构上分为简支箱梁和连续箱梁。高速铁路桥梁上支柱采用桥梁定位预制的法兰基础形式,支柱间距根据桥跨均匀布置。支柱形式有等径圆柱、H 型柱、格构式支柱等。

(3) 隧道内立柱基础。在隧道断面大、轨面以上面积达 100m²、净空高的情况下,可以采用洞顶立柱形式,同时需要将稳定性和可靠性相应增强。

(4) 路基支柱基础。从采用的形式看,支柱直埋、杯基、钻孔桩基础、混凝土管桩基础等都是路基基础可行的方式。

(5) 接触网立柱在车站、多线桥和高度超过 50m 的桥上均采用硬横跨;为不影响站台美观,在雨棚站台上,采取支柱和雨棚柱合建的方式。

1.3.6.5 接触网主要技术数据

(1) 导线高度。指接触导线距钢轨面的高度。导线高度的确定受多方面的因素制约,如车辆限界、绝缘距离、车辆和线路振动、施工误差等。一般,高速铁路客运专线的接触导线的高度比客货共线的接触导线低。高速铁路客运专线接触导线的悬挂高度为 5500mm 左右。

(2) 结构高度。指定位点处承力索距接触导线的距离。结构高度由所确定的最短吊弦长度决定。较大的结构高度有助于动态特性的改善,也有助于标准偏差的减少。因此,在高速接触网中,应力争较小的跨距和足够高的结构高度。

我国接触网的结构高度为 1100~1600mm。

(3) 跨距及拉出值。这两个值按以下方法确定:

1) 一般情况下的跨距计算。接触网一般以最大风偏作条件进行计算。拉出值对跨距有较大的影响。根据规范,受电弓在直线上左右摇摆量为 ±250mm;在曲线上左右摇摆量为 ±300mm。

2) 山口、谷口、高路堤和桥梁等风口范围内的跨距应按设计标准选用值缩小 5~10m,且最大跨距不宜大于 50m。相邻两跨距之比不宜大于 1.15:1;桥梁、隧道口、站场咽喉等困难地段不宜大于 1.25:1。

3) 绝缘关节处的跨距。目前绝缘关节一般均采用五跨锚段关节。根据规范,当受电弓上下晃动量 160mm 时,工作支与非工作支的高度差为 0.16m 处为转变点,对转换柱间的 2 支接触线均应进行风偏校验。另外绝缘锚段关节的转换跨距还需考虑上拔力影响,一般比正常跨距缩小。根据计算,转换柱间跨距为 41~45m。

4) 隧道内跨距 L 。高速运行中,平均弹性越小,接触网越稳定;但弹性与跨距有关,且与之成正比。因此在高速中,跨距小会降低悬挂的弹性,但使用较多的悬挂点,会增加硬点,同时会增加投资;而跨距大,弛度也随之增大,隧道的净空高度也需要增大,造成隧道投资增加,所以就有一个优化的问题。隧道内跨距应根据线路情况、悬挂类型、隧道断面及悬挂安装形式等因素确定。

隧道内跨距的大小主要取决于允许的接触线弛度,在结构高度确定的情况下,弛度与最短吊弦有关,根据规范隧道内最短吊弦大于或等于 400mm。

因此,隧道内采用的跨距一般为 30~45m,且跨距布置应尽量均匀,并尽量满足跨距比的要求。

隧道口第一跨跨距应与隧道内及隧道外相邻跨距相配合,同时验算是否需要降低接触线高度和结构高度。

(4) 锚段长度。接触网的锚段长度会影响到弹性,要确定锚段长度就必须求出接触网从中心锚结到补偿器的允许张力差。它的确定主要考虑接触导线和承力索的张力增量不宜超过 15% 或 10%,且张力补偿器工作在有效工作范围内。锚段长度与悬挂形式有关,下面以全补偿悬挂形式为例,对锚段长度进行分析。

1) 温度变化引起张力差在曲线和直线上不一样。

曲线时

$$\sigma T_c = \{[-L(L-D)\alpha\Delta t]/[2Rd_c + 0.5L(L-D)\alpha\Delta t]\} T_{cm} \quad (2.5-47)$$

$$\sigma T_j = \{[-L(L-D)\alpha\Delta t]/[2Rd_j + 0.5L(L-D)\alpha\Delta t]\} T_{jm} \quad (2.5-48)$$

式中: d_c 为承力索的旋转半径; R 为曲线半径; T_{cm} 、 T_{jm} 为承力索、接触线在补偿器的张力; d_j 为接触线的旋转半径; L 为由中心锚结至补偿器的距离(锚段长度之半); α 为线膨胀系数; I 为跨距。

直线时

$$\sigma T_c = \{(-L(L-D)\alpha\Delta t)/[(ld_c/2a) + 0.5L(L-D)\alpha\Delta t]\} T_{cm} \quad (2.5-49)$$

$$\sigma T_j = \{(-L(L-D)\alpha\Delta t)/[(ld_j/2a) + 0.5L(L-D)\alpha\Delta t]\} T_{jm} \quad (2.5-50)$$

直线区段的定位器或承力索座交替受拉和受压,这样张力变化较小。

2) 当考虑到弹性变形时,张力差为

$$\Delta T_e = \sigma T/[1 - (2\sigma T)/(3ES\alpha\Delta t)] \quad (2.5-51)$$

式中: ΔT_e 为弹性变形时的张力差; E 为弹性系数; S 为截面积; Δt 为极限温度与吊弦定位器正常位置时温度 t_0 的差值。

(5) 吊弦分布和间距。吊弦间距指一跨内二相邻吊弦之间的距离。吊弦间距对接触网的受流性能有一定的影响,改变吊弦的间距可以调整接触网的弹性均匀度。吊弦间距一般为 7~9m。

(6) 接触导线预留弛度。指在接触导线安装时,接触导线在跨内保持一定的弛度,以减少受电弓在跨中对接触导线的抬升量,改善弓网的振动。对高速接触网,简单链形悬挂设预留弛度,弹性链形悬挂一般不设预留弛度。

通过综合试验,接触导线预留弛度建议为 (0.3%~0.8%) l mm。

(7) 锚段关节。锚段关节是接触网的张力的机械转换关节,是接触网的薄弱环节,其设计和安装品质对受流影响较大。高速接触网一般采用两种形式的锚段关节:① 非绝缘锚段关节一般采用四跨锚段关节;② 绝缘锚段关节一般采用五跨锚段关节。

(8) 线岔及电分相。高速接触网线岔可采用交叉式、无交叉式及辅助中间切线过渡式结构。这三种形式在国外高速接触网都有成功的应用。鉴于交叉式线岔通过精确的设计定位和配合,同样可实现高速通过的要求,在国内外被大量采用。

高速接触网上,电分相一般采用两个锚段关节带中性无

电区组成的形式取代器件式电分相。为了使电力机车安全通过分相区,可采用车载式自动过分相系统。

车载式自动过分相系统是基于免维护地面定位技术的车载自动过分相控制系统。机车通过感应地面定位信号确定机车与分相点的相对位置,地面定位和机车感应信号分别采用斜对称埋设和备份接收,以保证自动过分相的安全和可靠。图 2.5-28 以机车向前运行为例来说明这种过分相。

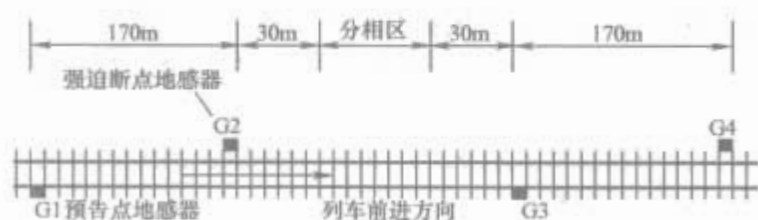


图 2.5-28 车载式自动过分相系统

1 号地面感应器是机车过电分相的预备信号(反向时是 4 号地面感应器),当机车通过地面感应器 G1(G4)点,接收到该信号时,控制装置记录机车即时速度 V ,根据速度计算出延时时间(包括司机指令回零时间、各辅助机组断开时间、劈相机断开时间和主断路器断开时间)。同时,司机台的过分相指示灯亮,表示控制装置已接收到分相点前车位定位信号,控制装置开始进行自动过分相控制。

2 号地面感应器是过电分相时的立即断电信号,同时是机车反向运行时的恢复信号。为了防止没有接收到过电分相的预备信号,它还起到应有的保护作用。当机车收到该信号时,控制装置经过 t_0 延时后,执行完毕自动过电分相的全部动作。

3 号地感器是车载过分相系统通过分相区后自动恢复信号发生器(或机车反方向运行时的立即断电信号),当机车感应器接收到其信号时,控制装置自动执行合主断路器、合辅机等系列动作。

4 号地感器是车载过分相系统反方向运行时的延时断电信号。

2 城市轨道交通供电系统

城市轨道交通供电系统是轨道交通运营的动力源泉,负责电能的供应与传输,分别为城轨电动列车供电和提供车站、区间、车辆段、控制中心等其他建筑物所需要的动力照明用电。要求供电系统具有高可靠性、稳定性和安全性,以保证连续不断的供电。城市轨道交通供电系统由主变电所(对于集中式供电)、牵引供电系统、动力照明系统、牵引网系统、杂散电流腐蚀防护系统、电力监控(SCADA)系统部分组成。

供电系统各部分有以下功能:

(1) 主变电所。将来自于城市电网的交流 110kV 电压降压为交流中压。

(2) 牵引变电所。将交流中压电压降压整流为轨道交通电动车组使用的直流 1500V 或 750V 电压。

(3) 降压变电所。将交流中压电压降压为交流 380/220V 电压。

(4) 牵引网。将来自于牵引变电所的直流电压通过受电弓(或集电靴)提供给轨道交通电动车组。

(5) 动力照明配电系统。将来自于降压变电所的交流 380/220V 电压提供给车站及区间的动力、照明设备。

(6) 电力监控(SCADA)系统。在轨道交通控制中心,通过调度端、通信通道和执行端(变电所自动化系统),完

成对主要电气设备遥控、遥信、遥测和遥调功能,实现对整个供电系统的运营调度和管理。

(7) 杂散电流腐蚀防护系统。减少因牵引供电引起的杂散电流数量并防止其对外扩散,尽量避免杂散电流对轨道交通本身及其附近结构钢筋、金属管线的电腐蚀,并对杂散电流进行监测。

(8) 防雷和接地系统。对沿线容易受到过电压侵入而损坏,从而影响系统运行的供电系统电气设备,提出设置过电压保护装置的要求。每座车站设一个强、弱电共用的综合接地网,各车站接地网通过接地扁钢、接触网架空地线等互相连接,使全线形成统一的、高低压兼容、强弱电合一的接地系统,为设备及人身安全提供防护。

2.1 供电电源系统

2.1.1 外部电源

从电网引入的外部电源包含集中式、分散式和混合式 3 种形式。外部电源形式不同,轨道交通系统引入的电源电压等级则不同,中压网络结构也不同。城市电网电压等级(kV)为交流 500, 220, 110, 10, 供电电压(kV)为 220, 110, 10, 常用的供电电压等级为 110kV 和 10kV。

2.1.2 中压网络

城轨供电电源从城市电力网引入交流电源,由主变电所通过中压网络提供电源给以牵引变电所为主组成的牵引供电系统和以降压变电所为主组成的动力照明供电系统。我国轨道交通系统中压网络的电压等级(kV)为 35, (33), 20, 10。其中 33kV 不是我国标准电压,因为进口设备的原因,仅在广州及上海地铁部分线路使用。

中压网络有多种结构形式。按负荷分,有牵引、动力照明相互独立的网络形式,牵引、动力照明混合网络形式。按供电形式分,有双环网式、单环网式、放射式、放射环网混合式。

2.1.3 负荷分类

根据用电负荷的重要程度,将负荷分为一、二、三级。

2.1.3.1 一级负荷

一级负荷必须由两个电源双回线路供电,当一个电源发生故障时,另一个电源不应同时受到损坏。其中特别重要的负荷,尚需增设应急电源。应急电源通常采用独立于正常电源的发电机组、蓄电池静止型不间断供电装置。

一级负荷的设备有牵引供电系统设备、应急照明、变电所操作电源、火灾自动报警系统设备、消防系统设备、地下站厅站台照明、地下区间照明、送排烟系统设备、通信系统设备、信号系统设备、电力监控系统设备、环境与设备监控系统设备、自动售检票系统设备、屏蔽门系统设备、防护门、防淹门、排雨泵及用于消防的自动扶梯、废水泵。其中应急照明、变电所操作电源、火灾自动报警系统设备、通信系统设备、信号系统设备为特别重要负荷。

2.1.3.2 二级负荷

二级负荷由两回线路供电,对于电梯及其他距离降压变电所不超过半个站台有效长度的负荷,可采用双电源单回线路供电。

二级负荷的设备有地上站厅站台照明、附属房间照明、普通风机、污水泵、电梯、自动扶梯。

2.1.3.3 三级负荷

三级负荷由单电源单回路供电,当电源系统中只有一个电源工作时允许切除该负荷。

三级负荷的设备有空调制冷及水系统设备、广告照明、

清洁设备、电热设备、锅炉设备。其中锅炉设备用于东北地区时，属于一级负荷。

2.1.4 供电方式

2.1.4.1 集中式供电系统

集中式供电适用于城市电网不发达或者可靠性较低的城市。轨道交通线路建设长度一般为14~25km，设置两座主变电所，负责全线用电负荷的电源。要求一台主变压器退出时，其他主变压器能承担供电范围内的全部一、二级负荷。该方案改善了供电的可靠性，便于管理和电源调度，容易实现电力资源共享。

集中式供电系统的外部电源要求两个或两个以上，引自城市电网220kV或110kV不同变电所或同一220kV或110kV变电所的不同母线。

当采用牵引、动力照明相互独立的网络形式时，牵引中压网络大多采用单环网式，动力照明中压网络大多采用双环网式。当采用牵引、动力照明混合网络形式时，中压网络大多采用双环网式或放射环网混合式。

2.1.4.2 分散式供电系统

分散式供电适用于电网发达的城市，沿轨道交通线路设置数个电源开闭所，负责全线的负荷用电。电源开闭所可与牵引变电所合建。该方案建设造价低，对外管理接口较多，有利于供电系统的维护管理及电力调度。

外部电源由城市电网就近向电源开闭所提供多组两个交流10kV电源。电源开闭所两个进线电源引自城市电网110kV不同变电所或同一110kV变电所的不同10kV母线。

中压网络一般采用牵引、动力照明混合的双环网式或放射环网混合式。

2.1.4.3 混合式供电系统

该系统为集中式供电系统和分散式供电系统方式的综合。

2.1.5 供电系统运行方式

供电系统运行方式包括供电系统正常运行方式和供电系统异常运行方式。供电系统运行方式是维护管理和电力调度的基础。

2.1.5.1 供电系统正常运行方式

供电系统在正常运行方式下，主变电所（或电源开闭所）、中压电源电缆在各自负责的供电范围内向用电负荷提供安全、可靠的正常电源。主变压器及中压电缆预留适当容量，满足供电系统异常运行方式下的用电需要。

2.1.5.2 供电系统异常运行方式

(1) 主变电所退出。一个主变电所退出后，其余的应能满足本线路（或相关线路应承担的供电范围）的一、二级负荷用电需要。必要时，在对城市交通组织影响不大的情况下，可适当降低线路运输能力，降低主变压器及中压电缆容量。

(2) 单台主变压器退出。单台主变压器退出时，其他主变压器能承担供电范围内的全部一、二级负荷。

(3) 中压网络电缆单回线路故障。中压网络电缆单回线路故障下，可采用牵引变电所、降压变电所中压母线分段开关投入的方式，双环网式供电系统也可采用相邻主变电所（或电源开闭所）越区供电的形式。

(4) 中压网络双回线路故障。中压网络电缆双回线路故障下，双环网式中压网络可采用相邻主变电所（或电源开闭所）越区供电的形式；单环网式、放射式中压网络，受影响的变电所退出运行；放射环网混合式中压网络可采用相邻变电所越区供电的形式。

(5) 牵引变电所退出。牵引变电所退出后，相邻牵引变电所直流牵引系统采用大双边供电方式。

(6) 降压变电所退出。降压变电所退出后，启动应急电源系统，保障应急照明、变电所操作电源、火灾自动报警系统设备、通信系统设备、信号系统设备在短时间内运行。

2.1.6 谐波与治理

随着半导体电力变流器、变频器等电力电子设备的广泛应用，越来越多的谐波电流被注入了电网。由于电力电子器件的非线性工作特性决定了基波电流滞后，且谐波的消极影响越来越严重，因此，如何有效地抑制谐波是电力设计中的一项重要内容。轨道交通系统谐波源有整流装置、电子计算机设备、气体放电光源、变频器、软起动装置、不间断电源装置、变电所直流操作电源、电容器的合闸涌流等。治理措施有：

- 1) 牵引供电系统采用等效24脉波整流装置。
- 2) 动力、照明设备自带消谐设备。
- 3) 电力变压器接线组别采用Dyn11，限制3次谐波。
- 4) 电力电容器加扼流电抗器。

2.2 主变电所

主变电所是集中供电方式中最重要的环节，是轨道交通系统与城市电网接口的部位。为节约城市土地资源，主变电所应尽量临近轨道交通线路，建于地下。当与城市电力部门合建时，也可设置在地面，但其与线路的电缆敷设距离不宜过长。

2.2.1 主接线

主变电所一般由2台主变压器、进线开关、馈出开关、母线开关、接地消弧圈构成。

高压侧主接线方式有外桥形、内桥形、变压器—线路单元接线；中压侧主接线方式有单母线分段，设置母线分段开关。

2.2.1.1 变压器—线路单元接线

如图2.5-29(a)所示，该接线方式适用于主变电所不设高压配电装置，一台主变压器退出时，其他主变压器能承担本主变电所供电范围内的全部一、二级负荷。其接线最简单，设备最少；线路故障或检修时，主变压器停运。

2.2.1.2 内桥形接线

如图2.5-29(b)所示，该接线方式适用于电源线路较长、故障率较高情况。该方式高压设备数量少；主变压器退出或投入较复杂，需操作两台断路器，影响一回线路的暂时停运；桥联断路器和出线断路器检修时，电源线路需停运较长时间。

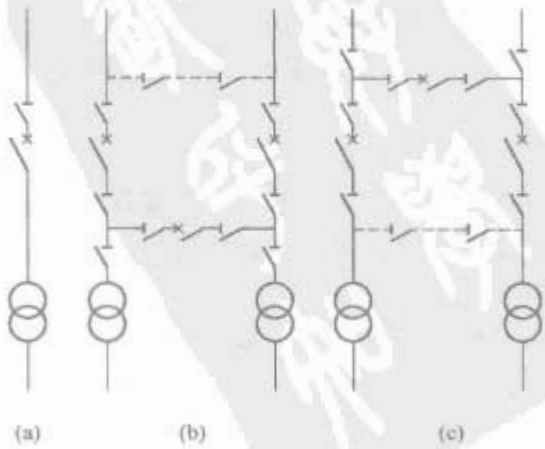


图 2.5-29 变压器—线路单元接线及桥形接线
(a) 变压器—线路单元接线；(b) 内桥形接线；
(c) 外桥形接线

2.2.1.3 外桥形接线

如图 2.5-29 (c) 所示, 该接线方式适用在电源线路较短, 故障率较少的情况, 当电源线路有穿越功率时, 也可采用。该方式高压设备数量少; 电源线路退出或投入较复杂, 需操作 2 台断路器, 并有 1 台主变压器暂时停运; 桥联断路器检修时, 两个回路需解列运行; 主变压器侧断路器检修时, 主变压器需停运较长时间。

2.2.2 所用电

所用电的服务对象为主变电所操作电源、照明、通风系统、气体灭火系统、排烟系统、主变电所电力监控系统。因主变电所设置在地面和设置在地下差异很大, 所用电源数量和容量也有所不同。

所用电源由接在中压母线分段上的 2 台变压器供电, 从变压器低压侧接线, 采用 380/220V 中性点直接接地的三相四线制。为保证设备及母线检修或运行试验时向应急照明、保护控制装置及变电所自动化系统等负荷供电, 增设蓄电池不间断电源装置。

所用动力、照明配电回路应独立设置, 以便降低动力设备运行对照明系统的影响。低压侧单母线分段, 设置母线分段断路器。

2.2.3 设备布置

2.2.3.1 布置原则

- (1) 为设备的安全运行和操作维修创造良好的工作环境。
- (2) 设备的布置满足安全净距并符合防火、防爆、防潮、防冻和防尘等要求。
- (3) 设备的检修和搬运不影响运行设备的安全。
- (4) 适应设备更新改造的空间需求。
- (5) 尽量减少电缆的交叉和电缆用量, 引线方便。

2.2.3.2 布置的一般要求

- (1) 主变压器安装在单独设备房间, 远离值班室。
- (2) 高、中压开关设备分室安装, 邻近主变压器室。
- (3) 电力监控系统设备安装在单独房间, 并紧邻值班室。
- (4) 不间断电源装置安装在单独设备房间, 邻近电力监控房间。
- (5) 主变压器室、配电装置房间不设置采暖设备。
- (6) 设备房间不得安装或穿越水管。

2.2.4 接地

2.2.4.1 一般规定

- (1) 为保证人身和设备的安全, 电气设备应接地并充分利用自然接地体接地。
- (2) 设置综合接地装置, 接地电阻应满足所有系统中接地电阻最小的电气设备的要求。
- (3) 电压为 1kV 及以下的交流电气设备, 中性点可直接接地。
- (4) 设置总等电位联结。PE 干线、电气装置接地极的接地干线、电气设备外露导电体、金属管道、建筑物钢筋等构成总等电位联结。总等电位联结借提高地电位和均衡电位来降低接触电压。
- (5) 应校核接触电压和跨步电压, 使其不超过规定值。
- (6) 设计接地装置时, 应考虑季节性土壤电阻率的变化因素。

2.2.4.2 接地范围

- (1) 电机、变压器、电器、携带式及移动式用电器具的底座和外壳。

- (2) 电气设备的传动装置。

- (3) 互感器的二次线组, 但继电保护方面另有规定者除外。

- (4) 配电装置与不间断电源装置的金属框架。

- (5) 铠装电缆的金属外皮、非铠装或非金属护套电缆的 1~2 根屏蔽芯线。

- (6) 建筑物钢筋、通风管道。

2.2.4.3 接地装置

变电所的接地装置, 除利用自然接地极外, 还应敷设以水平接地极为主要的人工接地网。人工接地网的外缘应闭合, 外缘各角应做成圆弧形, 圆弧的半径不宜小于均压带间距的一半。接地网内应敷设水平均压带。接地网的埋设深度不宜小于 0.6m。

接地网均压带可采用等间距或不等间距布置。

- (1) 有效接地和低电阻接地系统接地电阻值计算:

- 1) 一般情况下, 接地装置的接地电阻应符合式 (2.5-52), 即

$$R \leq \frac{2000}{I} \quad (2.5-52)$$

式中: R 为考虑到季节变化的最大接地电阻, Ω ; I 为计算用的流经接地装置的人地短路电流, A。

式 (2.5-52) 中计算用流经接地装置的人地短路电流, 采用在接地装置内、外短路时经接地装置流入地中的最大短路电流对称分量最大值, 该电流应按 5~10 年发展后的系统最大运行方式确定, 并应考虑系统中各接地中性点间的短路电流分配, 以及避雷线中分走的接地短路电流。

- 2) 当接地装置的接地电阻不符合式 (2.5-52) 要求时, 可通过技术经济比较增大接地电阻, 但不得大于 5Ω , 且应符合以下要求:

a. 防止转移电位引起的危害。对可能将接地网的高电位引向厂、所外或将低电位引向厂、所内的设施, 应采取隔离措施。

b. 考虑短路电流非周期分量的影响。当接地网电位升高时, 变电所内的 10kV 阀式避雷器不应动作或动作后应承受被赋予的能量。

c. 设计接地网时, 应验算接触电位差和跨步电位差。

(2) 不接地、消弧线圈接地和高电阻接地系统接地电阻值计算:

- 1) 高压与变电所电力生产用低压电气装置共用的接地装置应符合式 (2.5-53), 但不应大于 4Ω 。

$$R \leq \frac{120}{I} \quad (2.5-53)$$

- 2) 高压电气装置的接地装置, 应符合式 (2.5-54), 但不宜大于 10Ω 。

$$R \leq \frac{250}{I} \quad (2.5-54)$$

式中: R 为考虑到季节变化的最大接地电阻, Ω ; I 为计算用的接地故障电流, A。

对于装有消弧线圈的变电所电气装置的接地装置, 计算电流等于接在同一接地装置中同一系统各消弧线圈额定电流总和的 1.25 倍; 对于不装消弧线圈的变电所电气装置的接地装置, 计算电流等于系统中断开最大一台消弧线圈或系统中最长线路被切除时的最大可能残余电流值。

- 3) 在高土壤电阻率地区的接地电阻不应大于 30Ω , 且应降低接触电位差和跨步电位差。

2.2.5 主变电所设备

主变电所高压引入为三相交流 110kV, 中压馈出为三相

交流 35、20kV 或 10kV。下面主要介绍交流高压开关设备、中压开关设备和主变压器（主变电所中的电力变压器）。

2.2.5.1 交流高压开关设备

（1）GIS 设备和 HGIS 设备。110kV 交流高压开关设备主要采用 SF₆ 全封闭组合电器，它由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线、连接件和出线终端等组合在一起，这些设备或部件全部封闭在已接地的金属外壳中，在其内部充有一定压力的 SF₆ 绝缘气体，该设备简称 GIS（Gas Isolate System）。由于 GIS 是将多个高压电器元件有机地组合在一起，因此具有结构紧凑、元器件不受污染及大气环境因素的影响、安装方便、有利于缩短安装工期等特点。

GIS 设备自 20 世纪 60 年代实用化以来，目前世界上已有几千台 GIS 在运行。实践证明，GIS 运行安全可靠、配置灵活、环境适应能力强、检修周期长、安装方便。GIS 不仅在高压、超高压领域被广泛应用，而且在特高压领域变电所也被使用，在我国，63~500kV 电力系统中，GIS 的应用已相当广泛。

20 世纪 90 年代后期，世界上出现了一种紧凑型组合式高压开关设备。这种设备综合了敞开式设备 AIS 和封闭式开关设备 GIS 的优势，将高压元件高度集成，使高压开关设备更加紧凑，目前多数人称其为 HGIS，即“半 GIS（Half GIS）”。与敞开式开关设备相比，HGIS 把断路器、隔离/接地开关、TA、TV、避雷器等集成为一个模块，大大节省了占地面积，提高了设备可靠性；与 GIS 设备相比，省略了封闭式母线，节省了费用。ABB 的 PASS 型、三菱的 MITS 型、西门子的 HIS 型、Alstom 的 GIM 型等都属于此类产品。随着 HGIS 设备使用的升温，我国高压开关制造厂家也应更多关注这种设备，以满足电力部门要求缩小占地面积又节省投资的要求。当占地位置受到限制不能选用敞开式设备 AIS、投资又比较紧张不能选用封闭式组合电器 GIS 的变电所，推广使用 HGIS 更适合中国国情，能给使用维护带来更多的方便和实惠。HGIS 推动组合电器的技术进步迈上了新的台阶。

- （2）GIS 设备的主要技术参数：
- 1) SF₆ 组合电器主要参数见表 2.5-27。
 - 2) SF₆ 断路器主要参数见表 2.5-28。
 - 3) 母线筒主要参数见表 2.5-29。

表 2.5-27 SF₆ 组合电器主要技术参数

参 数	规 格
额定电压（kV）	126
额定电流（A）	1250，1600，2000，3150
额定频率（Hz）	50
额定短路开断电流（kA）	31.5
使用地点	户内
海拔（m）	≤2500
环境温度（℃）	-25~+40
相对湿度（%）	日平均≤95；月平均 90
地震烈度（级）	≤8
年漏气率（%）	≤1
SF ₆ 气体水分含量(体积比,×10 ⁻⁶)	断路器气室 150；其他气室 250

表 2.5-28 SF₆ 断路器主要参数

参 数	规 格
额定电流(A)	1250，1600，2000，3150
额定短路开断电流(kA)	31.5~40
额定短路关合电流(峰值)(kA)	80~1000
额定动稳定电流(峰值)(kA)	80~1000
额定热稳定电流(4s)(kA)	31.5~40
额定雷电冲击耐受电压(峰值)(kV)	对地、相间 550；断口间 630
额定短时工频耐受电压(有效值)(kV)	对地、相间 230；断口间 265
额定断路开断电流次数(次)	40~20
机械寿命(次)	5000
额定操作循环(s)	分-0.3-合分-180-合分
合闸时间(s)	≤0.1~0.08
分闸时间(s)	≤0.04~0.036
金属短接时间(s)	0.11~0.08
自动重合闸无电流间隔时间(s)	0.3
SF ₆ 气体额定表压(20℃)(MPa)	0.6
SF ₆ 气体监视表压(20℃)(MPa)	0.6
SF ₆ 气体闭锁表压(20℃)(MPa)	0.6

表 2.5-29 母线筒主要参数

参 数	规 格
额定电流（A）	1600，2000，3150
额定动稳定电流（峰值）（kA）	80~100
额定热稳定电流（4s）（kA）	31.5~40
额定雷电冲击耐受电压（峰值）（kV）	550
额定短时工频耐受电压（kV）	230
SF ₆ 气体零表压时工频耐压（5min）（kV）	>110
SF ₆ 额定表压（20℃）（MPa）	0.3
SF ₆ 补气表压（20℃）（MPa）	0.2

2.2.5.2 交流中压开关设备

交流中压开关设备在轨道交通中应用广泛。在主变电所、混合变电所、牵引变电所、降压变电所和降压跟随式变电所都需要使用。10、35kV 是国家标准电压级，在轨道交通普遍使用。20kV 是国际标准电压等级，也是《地铁设计规范》允许采用的电压等级，目前国内轨道交通还没有运营应用实例。

中压开关设备采用金属铠装封闭移出式开关柜和金属封闭气体绝缘开关设备。按灭弧介质分为真空和六氟化硫气体形式，轨道交通普遍采用以真空作为灭弧介质的真空断路器。按电气绝缘介质分为空气绝缘、复合绝缘和六氟化硫气体绝缘。采用空气绝缘的设备体积最大，采用复合绝缘次之，采用六氟化硫气体绝缘时设备体积最小。继电保护采用微机综合测控装置。

金属铠装封闭移出式开关柜用于主变电所、混合变电所、牵引变电所和降压变电所。金属封闭气体绝缘开关柜用于跟随式降压变电所。

真空断路器的绝缘类型分为空气绝缘、复合绝缘和固体绝缘。轨道交通多采用复合绝缘断路器。新型固体绝缘断路器将成为今后市场的主流。与复合绝缘真空断路器相比，固体绝缘真空断路器重要的改进在于对环境的耐受能力和极柱周围电场的均匀性。

图 2.5-30 (a) 中, 直流进线开关选用断路器, 简化了联锁关系, 便于迅速查找故障点。

图 2.5-30 (b) 中, 直流进线开关选用电动隔离开关, 降低了设备造价, 但联锁关系复杂。

2.3.3 控制、保护、信号

采用微机综合监控装置, 实现控制、保护、信号及测量功能。

2.3.3.1 控制

采用控制开关对操作对象实行强电一对一控制。牵引变电所采用远程控制、集中控制及就地控制三种形式。

(1) 断路器控制回路需满足以下要求:

- 1) 能监视电源及跳、合闸回路的完整性。
- 2) 具备防止断路器“跳跃”闭锁功能。
- 3) 合闸或跳闸完成后应使命令脉冲自动解除。
- 4) 远程控制、集中控制及就地控制之间互斥。

(2) 采用数据线传输信息时, 信号开入量采用开关量形式, 通过控制线将基础设备的信号送至微机综合监控装置。

(3) 直流馈线设置带有线路故障性质判断的自动重合闸装置。

(4) 直流馈线大双边联跳条件可自动转换。

2.3.3.2 保护

(1) 中压配电装置保护。中压网络结构形式不同, 采用的保护内容也有所不同。

1) 进线断路器。可构成线路纵联差动保护或电流选跳保护、定时限过流保护、零序保护。

2) 联络馈线断路器。可构成线路纵联差动保护或电流选跳保护、定时限过流保护、零序保护。

3) 牵引整流机组断路器。可构成速断保护、定时限过流保护、过负荷保护、超温跳闸、零序保护、被直流侧断路器联跳、过温报警。

4) 配电变压器断路器。可构成速断保护、定时限过流保护、过负荷保护、超温跳闸、零序保护、过温报警。

其中过负荷保护仅当配电变压器容量大于 250kVA 时采用。

(2) 直流配电装置保护有以下三种:

1) 直流进线开关。当直流进线开关为断路器时, 采用大电流速断保护, 被牵引整流机组中压断路器联跳。

2) 直流馈线断路器。可构成大电流速断保护、电流变化率及其增量 ($di/dt + I$) 保护、过电流保护、线路电压保护、自动重合闸及双边联跳保护, 被直流进线断路器联跳、被直流设备框架泄漏保护装置联跳、紧急分闸。

3) 负极柜。构成直流设备框架泄漏保护。

2.3.3.3 信号

(1) 基础设备就地指示信号。基础设备本体应具备以下信号:

- 1) 操作电源信号。
- 2) 断路器合闸及跳闸的位置信号, 一般为双灯制接线。
- 3) 带电显示信号。

(2) 异地指示信号。所谓异地信号, 是指通过电力监控系统将基础设备的各种信息送至牵引变电所、车站控制室和控制中心。指示信号包括开关状态信号、事故信号、故障信号等。

2.3.4 联锁

联锁功能是保证人身和设备安全的重要措施, 也是保证电力调度正常使用的手段。

2.3.4.1 中压配电装置联锁

(1) 进线断路器与进线隔离开关、母线联络断路器与母线联络隔离开关之间相互联锁, 防止隔离开关误操作。

(2) 进线断路器与母线分段断路器之间相互联锁, 防止中压系统合环运行。

(3) 变压器封闭金属外壳门与牵引整流机组断路器之间相互联锁, 防止主回路未断电时变压器封闭金属外壳门被打开。

(4) 开关柜本体断路器与接地开关之间相互联锁。

(5) 两个中压网络之间的中间变电所电源联络断路器与进线断路器相互联锁, 防止中压系统合环运行。

2.3.4.2 直流配电装置联锁

(1) 进线断路器与负极柜隔离开关之间相互联锁。

(2) 馈线断路器与上网隔离开关之间相互联锁。当进线开关为隔离开关时, 馈线断路器与进线隔离开关之间相互联锁。

(3) 纵向联络隔离开关与对应两个上网开关柜内的隔离开关之间相互联锁。

2.3.5 所用电

2.3.5.1 地面牵引变电所

当单独设置地面牵引变电所时, 所用电的服务对象为地面独立牵引变电所的操作电源、照明、通风系统、气体灭火系统、排烟系统、变电所综合自动化等。

所用电源由接在中压母线分段上的两台变压器供电。从变压器低压侧接线, 采用 380/220V 中性点直接接地的三相四线制。为保证设备及母线检修或运行试验时向应急照明、保护控制装置及变电所自动化系统等负荷供电, 增设蓄电池不间断电源装置。

低压侧采用单母线分段接线, 设置母线分段开关。所用动力、照明配电回路应独立设置, 以便降低动力设备运行时对照明系统的影响。

2.3.5.2 地下牵引变电所

地下牵引变电所设于轨道交通地下车站, 应与车站内降压变电所合建。所用电的服务对象为变电所的操作电源、照明、变电所综合自动化等。

所用电源由变电所低压开关柜的不同母线供电, 设置双路电源自动切换装置, 采用 380/220V 中性点直接接地的三相四线制。为保证设备及母线检修或运行试验时向应急照明、保护控制装置及变电所自动化系统等负荷供电, 增设蓄电池不间断电源装置。

所用电低压侧为单母线接线。

2.4 牵引变电所设备

牵引变电所设备有中压开关设备、直流开关设备、牵引整流机组 (牵引整流变压器、整流器)、钢轨电位限制装置、排流柜等。

2.4.1 直流开关设备 (直流开关柜、负极开关柜、上网开关柜)

直流开关设备包括直流开关柜和上网开关柜。直流开关柜包括正极开关柜、负极开关柜和馈出开关柜。正极开关柜内可采用直流快速开关或电动隔离开关; 负极开关柜内设电动隔离开关或手动隔离开关; 馈出开关柜采用直流快速开关; 上网开关柜包括纵向联络开关, 设备采用电动隔离开关; 直流开关柜的继电保护设备采用微机综合测控装置。

(1) 直流开关柜主要技术参数见表 2.5-34。

(2) 上网开关柜主要技术参数见表 2.5-35。

(3) 直流快速开关主要技术参数见表 2.5-36。

(4) 电动/手动隔离开关主要技术参数见表 2.5-37。

表 2.5-34 直流开关柜主要技术参数

参 数	指 标
额定直流电压 (kV)	1, 2
额定直流绝缘电压 (kV)	1.6, 3
额定工频耐压(回路对框架,1min)(kV)	1 次 5, 8.5; 2 次 2
母线额定电流 (kA)	2~9
馈出回路额定电流 (kA)	2.5~6
外壳防护等级	IP20

表 2.5-35 上网开关柜主要技术参数

参 数	指 标
额定直流电压 (kV)	1, 2
额定绝缘电压 (kV)	1.6, 3
额定工频耐压(回路对框架)(kV)	1 次 5.5, 8.5; 2 次 2
额定电流 (kA)	4
外壳防护等级	IP40

表 2.5-36 直流快速开关主要技术参数

参 数	规 格
额定直流电压 (kV)	1, 2
额定直流绝缘电压 (kV)	1.6, 3
额定电流 (kA)	2.5, 6
过负荷能力 (环境温度 40℃)	额定负荷长期运行
1.5 倍额定过负荷 2h	
3 倍过负荷 1min	
额定开断短路电流 (kA/10ms)	100
机械寿命 (次)	>20 000
合闸时间 (ms)	≤300
固有分闸动作时间 (ms)	≤5
全分闸时间 (ms)	≤20
开关本体过电流整定范围 (kA)	6~1.2

表 2.5-37 电动/手动隔离开关主要技术参数

参 数	指 标
极数	1, 2, 3
额定直流电压 (kV)	1, 2
额定直流绝缘电压 (kV)	2, 3
额定电流 (kA)	2, 8
允许短路持续电流 (kA)	50(≤2kA); 75(>2kA)
短路持续时间 (s)	1
分合操作机械寿命 (次)	10 000
电动分闸合闸时间 (s)	≤6

2.4.2 轨道电位限制装置

为减少杂散电流对土建结构钢筋、钢轨、设备金属外壳及其他地下金属管线产生腐蚀,轨道交通在建设过程中把直流牵引供电系统设计为不接地系统,对直流供电设备采用绝缘安装,钢轨通过绝缘垫与大地绝缘,以减少杂散电流的泄漏。

当供电区段有起动或运行的列车、或发生系统短路故障时,因钢轨作为牵引回流的通路以及钢轨与地之间过渡电阻的存在,钢轨对地会产生一定的悬浮电位差。为此在每个车

站和车场设置轨道电位限制装置,在轨道对地电位超过人体耐受电压值时将钢轨对地短接,以防止轨道对地电位过高造成人身伤害。人体耐受电压与时间有一定的关系,见表2.5-38。

表 2.5-38 人体耐受电压与时间的关系

参 数	指 标						
电压 (V)	940	770	660	535	480	435	395
时间 (s)	0.02	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

(1) 轨道电位限制装置主要技术参数,见表 2.5-39。

表 2.5-39 轨道电位限制装置主要技术参数

参 数	指 标
额定直流电压 (kV)	1, 2
系统最高工作电压 (kV)	2, 3
装置动作电压的调节范围 (V)	25~200
装置全动作时间 (ms)	≤200
接触器操作频率 (次/h)	120
接触器机械寿命 (万次)	>150
接触器额定电流 (A)	1250
承受短路电流能力 (kA/ms)	50/100
标称放电电流 (kA/40μs)	100
外壳防护等级	IP40

(2) 主要技术性能。轨道电位限制装置由接触器、晶闸管回路、测量和操作回路、信号接口端子、保护装置、防凝露加热器、状态显示设备等组成。正常情况轨道电位不对人体构成危害,但在下列情况轨道对地电位会陡升:

- 1) 接触网与钢轨发生短路。
- 2) 接触网对架空地线(地)发生短路故障。
- 3) 直流设备发生柜架泄漏故障。
- 4) 牵引变电所整流变压器二次侧交流系统发生单相接地短路。

根据人体耐受电压与时间的关系,把轨道电位限制装置的动作电压和时间分为 3 段。当轨道电位限制装置检测到钢轨与地之间的电压差大于装置Ⅰ段动作电压时,接触器在经过一段可调整的延时后合闸,将钢轨与大地进行有效短接,经一定时间恢复开断。

当轨道电位限制装置检测到轨道与保护地之间的电压差大于Ⅱ段动作电压时,接触器永久合闸,不再恢复开断。

当轨道电位限制装置检测到轨道与保护地之间的电压差大于Ⅲ段动作电压时,晶闸管回路首先导通,使轨道与地连接,然后起动接触器合闸。接触器合闸后,晶闸管回路立即断开。

轨道电位限制装置设有电压测量回路、测量轨道和地之间的电位差。操作回路用来对短路装置的动作进行控制。轨道电位限制装置内设有信号接口模块,轨道电位限制装置的状态、报警信号、控制电源故障、装置闭锁信号及测量数据在本装置上显示的同时,可通过综合自动化信号在远方终端显示。

2.4.3 排流柜

排流柜是杂散电流腐蚀防护系统中的重要设备。排流柜对结构钢筋、道床钢筋的极化电压等进行动态监测,当走行轨绝缘下降,杂散电流增大超过设定范围时,排流柜将杂散电流收集网(排流网)中的杂散电流返回直流牵引供电系统

负母线。
排流柜应具有如下功能：

- 1) 单向极性排流。
 - 2) 自动调节排流电流值，大电流限度排流。
 - 3) 自动监测记录排流网的极化电位值和排流电流值。
 - 4) 具有与综合监控系统的通信功能。
- 排流柜主要技术参数见表 2.5-40。

表 2.5-40 排流柜主要技术参数	
参 数	指 标
交流绝缘电压 (kV)	1
主回路工频耐压 (1min) (kV)	5
辅助回路工频耐压 (1min) (kV)	2
额定排流电流 (A)	150
短时耐受电流 (kA/20ms)	10
外壳防护等级	IP20
交流电源 (50Hz) (V)	220±22

2.4.4 整流机组

整流机组是牵引变电所的核心设备，由整流变压器和整流器及其附件组成。为了满足直流输出的需要，整流变压器将来自电网的高电压转变成一定大小和相数的低电压，经整流器整流后为列车提供动力。整流机组是列车高速、安全、可靠、经济、节电地运行的保证。整流机组有以下特点：

- 1) 负载为非正弦波电流。由于输入的正弦波电流通过整流器后成为带脉动成分的矩形波，所以整流变压器绕组中的电流波形是含有谐波成分的非正弦波。
- 2) 为减少高次谐波对电力系统的影响，采用等效 24 脉波整流电路。
- 3) 负载变化范围大。频繁的起动、停车，经常有不同程度的短时过载。
- 4) 为了保护整流器抑制短路电流以及在换相时起到平衡电抗的作用，要求整流变压器的短路阻抗和漏抗比普通的电力变压器大。

2.4.4.1 等效 24 脉波整流电路的构成

为了提高功率因数、降低整流变压器网侧线电压波形畸变以减少对电网的干扰，以及降低输出直流电压的纹波系数，城市轨道交通牵引供电系统中的整流机组采用等效 24 脉波整流电路。表 2.5-41、表 2.5-42 列出脉波数与谐波电流、纹波系数的关系。随着脉波数增加，谐波电流和纹波系数相应减少。

表 2.5-41 脉波数 P 与谐波电流最大幅值关系				
参 数	指 标			
脉波数 P	6	12	24	48
5~49 次谐波电流最大幅值的百分数 (γ=0)	62.4	28.4	11.6	3.3

注 谐波电流以整流器交流电流总的有效值的百分比表示。

表 2.5-42 脉波数 P 与纹波系数的关系				
参 数	指 标			
脉波数 P	6	12	24	48
纹波系数	7.015	1.72	0.429	0.107

注 纹波系数为直流电压峰值与谷值之差的一半对平均值的百分比。

24 脉波整流电路由两套等效 12 脉波整流电路构成，等效 12 脉波整流电路由两个 6 脉波三相整流桥并联组成。其

中一个三相整流桥接向整流变压器的阀侧星形绕组，另一个三相整流桥接向整流变压器的阀侧三角形绕组。因为每台整流变压器阀侧星形绕组和三角形绕组相对应的线电压相位错开 30°，所以可以得到两个三相桥并联组成的 12 脉波整流电路。当供给两台 12 脉波整流器的整流变压器高压网侧绕组分别采用延边三角形移相±7.5°时，两套整流器并联运行即可构成等效 24 脉波整流。

图 2.5-31 是 12 脉波整流机组电路和相量图。由一台 3 绕组 D/dy11 整流变压器及两个三相整流桥并联组成。网侧绕组为三角形 D，阀侧绕组有两个，一个为三角形 d；一个为星形 y。这里网侧线电压与阀侧线电压的相位差采用时钟表示法。D 与 d 相位相同， E_{AB} 和 E_{a2b2} 指在 12 点。星形 y11 即 E_{a1b1} 指在 11 点。因此构成了三角形线电压 E_{a2b2} 与星形线电压 E_{a1b1} 相位差 30°。

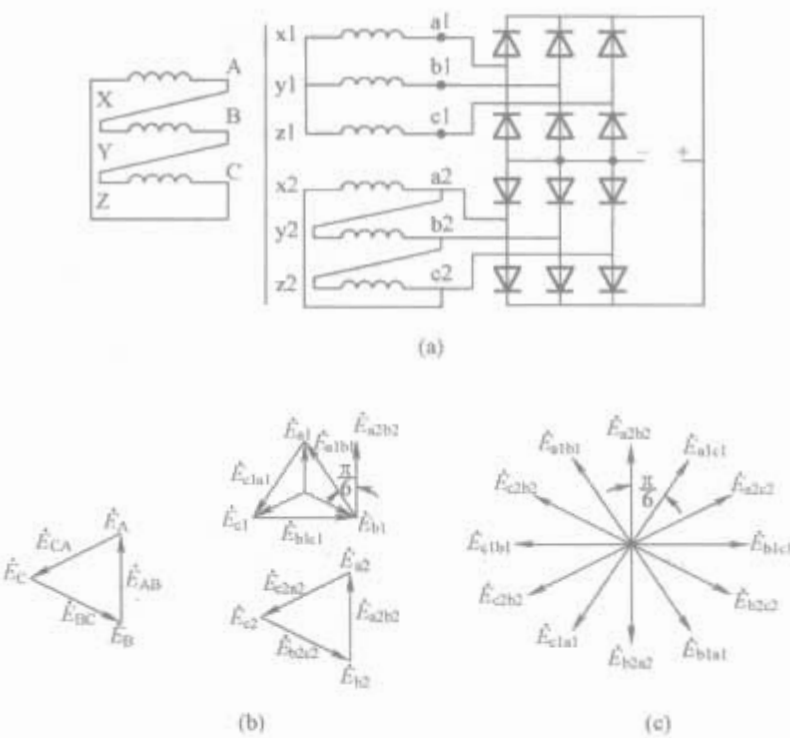


图 2.5-31 12 脉波整流机组电路和相量图
(a) 12 脉波整流电路图；(b) D/dy11 整流变压器绕组电压相量图；(c) 整流换相顺序图

24 脉波整流由两组 12 脉波整流机组并联构成。它们可以并联工作，也可以串联工作。图 2.5-32 是等效 24 脉波的组成相量图。通常每个牵引变电所有两台 12 脉波整流机组。例如整流变压器的网侧绕组采用延边三角形移相的方法，相对线电压 E_{AB} ，T1 移相+7.5°，T2 移相-7.5°，网侧绕组 E_{A1B1} 与 E_{A2B2} 相位差就是为 15°。而合成后 T1、T2 的阀侧 y 和 d 的线电压相位差也是 15°，经整流后便输出 24 脉波电压。



图 2.5-32 24 脉波延边三角形移相示意图

国内普遍采用两台 12 脉波整流机组并联工作，这就需要与它们连接的变压器阀侧星形绕组和阀侧三角形绕组输出电压相等，即要求绕组的匝数比相同。但是星形绕组和三角形绕组的匝数比为 1:√3，而√3是一个无穷小数，势必造成它们的匝数比有误差，输出电压有差异。由于电压高的那个

桥有嵌位作用，可能造成某个时刻只有 1 个三相整流桥工作，而不是两个三相整流桥同时并联输出直流电流，从而功率减半。表 2.5-43 列出使输出电压接近的匝数比，且误差较小的组合。

表 2.5-43 接近 1:√3 的匝数比组合						
Y 绕组匝数	4	7	11	15	16	19
d 绕组匝数	7	12	19	26	28	33
匝数比	1.75	1.716	1.727	1.733	1.75	1.73
与√3误差 (%)	1.15	0.98	0.29	0	1.15	0.2

为了弥补 12 (24) 脉波并联整流桥输出电压的差异，可使用 6 倍频率的平衡电抗器。但是现在城轨供电系统整流机组在并联整流桥之间都不采用电流平衡电抗器，这是因为：

(1) 由于匝数比有误差，直流负荷分配不均匀会使平衡电抗器产生直流磁化引起磁饱和，降低其平衡效果。

(2) 三相桥工作时，不平衡电流的通路总有 2 相阀侧绕组与一对二极管桥臂和负载串联。在整流变压器电抗较大情况下，可以将三相输入端的漏抗归算到直流输出端，等效归算电抗可以起着平衡电抗器的作用。

因为整流变压器阀侧绕组漏抗值有限，不加平衡电抗器在小负荷时两个整流器不是同时并联输出，而是工作在推挽状态。此工作期间的整流器将提供 2 倍的输出电流，同时交直流侧谐波含量也稍有增加，但是由于负荷小，对于整流机组的性能影响甚微。

2.4.4.2 整流机组主要技术要求

见表 2.5-44。

表 2.5-44 整流机组主要技术要求	
参 数	规 格
整流方式	等效 24 (12) 脉波整流
额定负荷时效率 (%)	≥98
额定负荷时功率因数	≥0.95
固有电压调整率 (%)	≤6
谐波电流	满足 GB 10236 规定
负载等级 (GB/T 3859 VI 级)	额定负荷连续运行，1.5 倍额定负荷 2h，3 额倍定负荷 1min

2.4.4.3 整流机组空载电压

假定不考虑换相重叠角，P 脉波二极管整流器输出平均电压按式 (2.5-55) 计算，即

$$U_d = \frac{PU_{max}}{\pi} \sin \frac{\pi}{P} \tag{2.5-55}$$

式中：U_d 为整流器平均电压；P 为脉波数；U_{max} 为阀侧线电压峰值。

计算二极管整流器阀侧电压 U₂ 与直流输出电压 U_{d0} 的比值 K，见表 2.5-45。

表 2.5-45 二极管整流器 U ₀ /U ₂					
参 数	规 格				
脉波数 P	2	6	12	24	48
K=U _{d0} /U ₂	0.900	1.350	1.398	1.410	1.413

根据上述系数 K 可计算出各种阀侧电压 U₂ 下整流器的空载电压 U_{d0}，见表 2.5-46。

表 2.5-46 整流器空载电压 U _{d0}				
参 数	规 格			
阀侧电压 U ₂ (V)	1180	1220	595	610
12 脉波 U _{d0} (V)	1649.6	1705.5	831.8	852.8
24 脉波 U _{d0} (V)	1664	1720.4	839	860.2

2.4.5 干式牵引整流变压器

城市轨道交通牵引变电所一般设置在城市中间或地道下面，要求整流变压器体积小、工作可靠。干式变压器由于具有结构简单、维护方便、防火阻燃、防尘、防潮等特点，因此被广泛应用在对安全运行有较高要求的城市轨道交通牵引变电所。当前干式整流变压器主要有环氧树脂浇注干式变压器 (CRDT) 及浸漆型干式变压器 (OVDT) 两大类型。环氧树脂浇注的干式变压器机械强度高，耐受短路能力强，防潮及耐腐蚀性能特别好，且局部放电小、运行寿命长、损耗低。OVDT 类干式变压器无需浇注设备与模具，可以减少工厂的初期投资。其绕组层间、匝间绝缘采用聚酯纤维纸或聚芳胺合成纸 (Nomex)，是耐温等级 C 级 (220℃) 的耐高温绝缘材料，具有阻燃、防潮及优良环保特性，允许长时间大负荷过载，运行可靠性较高。从性能、成本方面来讲，二者相差无几。但是由于技术引进的先后和使用习惯，现有城市地铁及轨道交通多数使用环氧树脂浇注干式整流变压器。

2.4.5.1 整流变压器技术性能

(1) 整流变压器类型。分为干式、户内、自冷、环氧树脂浇注或浸漆型。

(2) 网侧额定电压。10、20、35 (33) kV。其中 20kV 用在出口的变压器上，国内尚无使用。33 kV 不是我国标准电压，受进口变压器的影响只在广州、上海一些线路使用。

(3) 负载等级。符合 GB/T 3859 即 100% 额定负荷连续运行；150% 额定负荷 2h；300% 额定负荷 1min。

(4) 联结方式。采用单台牵引整流变压器 6 相 12 脉波时为 Dy11d0 或 Dy5d0 联结。采用 2 台牵引整流变压器 12 相 24 脉波时：

1) I 号变压器 Dy11d0 (移相 +7.5°)，II 号变压器 Dy1d2 (移相 -7.5°)；

2) I 号变压器 Dy5d0 (移相 +7.5°)；II 号变压器 Dy7d2 (移相 -7.5°)。

(5) 整流变压器主要技术要求见表 2.5-47。

表 2.5-47 整流变压器主要技术要求	
参 数	规 格
网侧额定电压分接 (%)	±2×2.5
绝缘耐热等级	F 级或 H 级
两绕组阀侧空载电压不平衡度 (%)	≤0.3
两台变压器短路阻抗不平衡度 (%)	3
两绕组短路阻抗不平衡度 (%)	3
局部放电量 (pC)	≤10
绕组温升 (K)	F 级 70；H 级 85
噪声 (额定负荷) (dB)	≤55

2.4.5.2 结构

(1) 高、低压绕组采用圆筒式，铜导线绕制。

(2) 铁心采用高标号、低损耗冷轧优质高导磁冷轧硅钢片。

(3) 高低压侧导线的连接采用电缆。

(4) 整流变压器带运输轮子，并能固定安装，顶部备有承受整流变压器整体总重的起吊用吊环。

(5) 整流变压器设置温控显示仪，可显示绕组及铁心温度，并能输出温度报警及跳闸信号，此信号同时送向变电所综合自动化系统及远方电力调度系统。

(6) 整流变压器的铁心和金属件均有防腐蚀的保护层，并可靠接地 (铁轭螺杆除外)。整流变压器外形如图 2.5-33 所示。

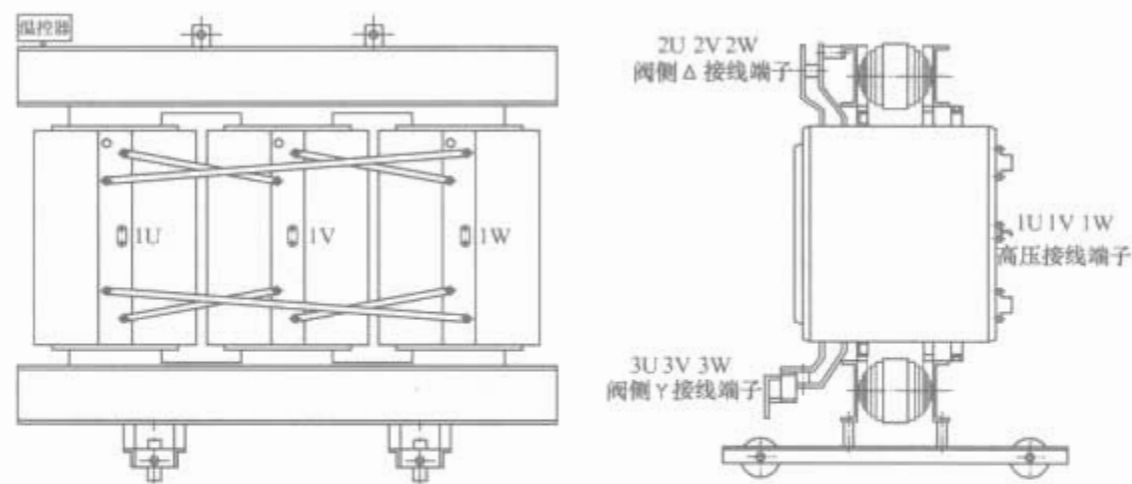


图 2.5-33 整流变压器外形图

2.4.6 牵引供电整流器

在直流供电系统中，牵引变电所供电整流器的任务是将三相交流电整流成直流电，然后通过接触网或第三轨向城轨车辆供电。整流器由大功率二极管及其散热器、保护器件、故障显示器件、通信接口等组成。整流器在城市中或隧道下工作，可靠性要求特别高，噪声、谐波污染要小，应具有远程控制、无人值守功能，维修要少。满足上述要求的是 24 脉波（12 脉波）整流，它最为经济实用。其主电路由两个 3 相全波整流桥并联或串联后，与整流变压器组成 12 脉波或者 24 脉波输出。由于整流器的主要部件二极管是由不到 1mm 厚的硅单晶片制成，其热容量很小，对电流、电压非常敏感。为了保证地铁列车高速安全、可靠、经济运行，对整流器的过电流、过电压保护十分重要。

2.4.6.1 整流器主要技术参数

整流器主要技术参数见表 2.5-48。

表 2.5-48 整流器主要技术参数表		
参 数	1500V 系统	750V 系统
额定功率(kW)	1500~4000	1500~2250
额定频率(Hz)	50	
额定阀侧电压(V)	1180~1220	590~610
额定直流电压(V)	1500	750
最高直流电压(V)	1800	900
负荷特性	反电动势、再生	
负荷等级(GB/T3859)Ⅵ类	额定负荷连续；1.5 倍额定负荷 2h；3 倍额定负荷 1min	
主回路工频耐压(kV/1min)	5	3.8
辅助回路工频耐压(kV/1min)	2	2
冲击电压(1.2/50μs 冲击波)(kV)	12	7
二极管电压 U_{RRM} (V)	≥4400	≥3000
冷却方式	自然风冷，户内安装	
外壳防护等级	IP20	

2.4.6.2 整流器保护

- (1) 过电压保护。交、直流侧过电压和换相过电压保护采用 RC 回路。
- (2) 短路保护。快速熔断器和逆流保护。
- (3) 超温保护。在散热器最热的位置或其他需要超温保护的处所加装测温元件。

各种保护的数据检测系统和故障显示系统具有 RS485 通信接口，可实现故障本机屏面显示、触点显示和远程显示。

2.4.6.3 整流柜结构

整流器柜一般采用标准的 GGD 屏柜，要求屏柜无焊接，为全螺栓结构，以便故障时拆卸更换。屏柜门板及外骨架采用喷塑防护，绝缘材料阻燃。为防止地下潮湿产生凝露，设置防凝露控制器。在高温、高湿季节，为防止凝露，开机前可先打开加热板，待整流柜内温度升高后再通电。

12 脉波整流器 1500V 系统功率不大于 3000kW 和 750V 系统功率不大于 2250kW 时，可以使用一个标准的 GGD 屏柜，外形尺寸为 1200mm×1200mm×2300mm。为了冷却散热，功率更大时需要两个整流柜。

2.4.6.4 采用热管散热器的城轨供电整流器

重力式热管散热的原理见图 2.5-34，具有液体传热介质的加热部受热后，介质汽化把热量带到散热部。当散热片把热量散发后，介质冷却成液体依靠重力又返回到加热部，以此反复循环。因其是以介质相变传热为机理，故传热快、热阻小，在国外工业各部门以及地铁、轻轨斩波器上早已获得广泛应用。近年来国内热管散热器技术日趋成熟，随着电力电子器件功率的增大，原有散热器已不能满足散热要求，热管散热器将越来越多被广泛采用。例如在干线内燃、电力机车主变流器，地铁检修车，“中原之星”辅助变流器，城市轨道交通能量吸收装置等处已被使用。

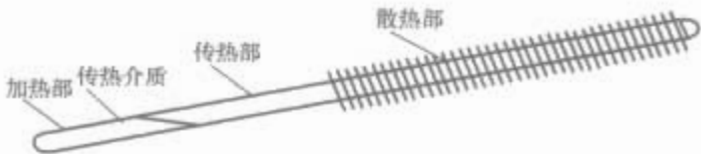


图 2.5-34 重力式热管散热原理图

城轨供电整流器是由 12 脉波或 24 脉波组成的多相整流器，一般为空气自然冷却。由于其输出功率大，现国内外一般使用铝散热器。铝散热器散热能力小，就需要多个半导体元件并联使用，使得桥臂并联支路电流均衡度差，元件利用率低，屏柜体积大，地铁变电所建筑面积大，投资增加。

自然冷却热管散热器的热阻还不到铝散热器的一半，采用热管散热器后，原来每个桥臂需要 4~6 个并联元件的，现在只要 2~3 个，原来要 2 个屏柜的，现只要 1 个屏柜即可，从而可降低损耗，提高元件利用率，减少投资。

2.4.7 框架保护装置

框架保护装置主要用于当直流设备正极对设备外壳发生短路时，启动相应断路器跳闸，快速切除故障，使供电设备免遭损坏。它主要由电流、电压测量元件组成。电流测量元件一端接设备外壳，另一端接地，用于检测外壳与地之间流过的故障电流。电压测量元件用于测量设备外壳与直流设备负极之间的电压，一端接于负极，另一端接设备外壳。

当任意一个直流设备内正极对外壳短路时，接地电流通

过电流测量元件流入地网，再通过钢轨与地之间的过渡电阻（或排流柜）回到钢轨（负极）。当接地电流达到整定值 30~80A 时，框架保护的电流元件动作跳闸；同时电压测量元件检测负极与设备外壳间的电压值，当电压大于整定值时，输出Ⅰ段电压 60~70V 报警；输出Ⅱ段电压 90~100V 跳闸。电压元件在整定的时间内动作，使相应的交、直流断路器跳闸，切除故障。

2.5 降压变电所设备

降压变电所中的设备有中压开关设备、配电变压器和低压开关设备，以下重点介绍后两种。

2.5.1 配电变压器

配电变压器将中压电源降压，供应轨道交通动力照明负荷的低压电源。配电变压器的电压比分为 35/0.4kV 和 10/0.4kV 2 种。以前配电变压器多采用环氧树脂浇注干式变压器，后来趋向于使用更加环保、节能的产品。

配电变压器主要技术参数见表 2.5-49。

表 2.5-49 配电变压器主要技术参数

参 数	规 格
变压器类型	干式
安装与冷却	户内安装、空气自冷
额定高低压变比	10/0.4, 35/0.4
额定频率 (Hz)	50
相数	三相
变压器调压方式	无励磁分级调压
一次侧分接 (%)	2×2.5
联结组别	Dyn11
绝缘水平	LI75AC35/LI0AC3 (10kV) LI170AC70/LI0AC3 (35kV)
绝缘耐热等级	>F 级或 F 级
温升限值 (线圈) (K)	<100
局部放电 (pC)	5
噪声水平 (dB)	55
设计寿命 (年)	≥30
外壳防护等级	IP20

2.5.2 低压开关设备

低压开关设备是轨道交通低压动力照明负荷的配电中心，降压变电所的低压开关设备即为低压开关柜，多采用金属封闭间隔式开关柜，内置开关可采用固定、插拔式和抽出式安装方式。

低压开关柜主要参数技术见表 2.5-50。

表 2.5-50 低压开关柜主要技术参数

参 数	规 格
额定电压 (V)	690
额定绝缘电压 (V)	1000
额定冲击耐受电压 (kV)	8
水平母线最大工作电流 (kA)	6.3
垂直母线最大工作电流 (kA)	1.6
水平母线额定短时耐受电流 (1s) (kA)	80
水平母线额定峰值耐受电流 (kA)	176
垂直母线额定短时耐受电流 (1s) (kA)	65
垂直母线短时峰值电流 (kA)	176
外壳防护等级	IP40

2.6 牵引网

2.6.1 牵引供电制式

根据国家标准，城市轨道交通直流牵引供电系统电压等级有 DC750V 和 DC1500V 两种；电动车组受流方式按安装位置的不同也有接触轨受流方式和架空接触网受流方式两种。DC750V 一般采用接触轨授流方式，DC1500V 一般采用架空接触网受流方式。

接触轨受流是将接触轨沿走行轨敷设，电动车组通过集电靴与其接触取电。早期的接触轨一般由高电导率的特殊软钢（低碳钢）制成，具有安装简单、价格便宜、载流量大等优点，但存在接触轨自重大、电阻率高、电能损耗大等缺点。近年来，国内外城市轨道交通工程已开始采用钢铝复合接触轨（以下简称复合轨），它是将不锈钢带通过机械方法与铝合金型材相结合制成。与传统的接触轨相比，具有质量小（在载流能力相同的情况下，复合轨的单位长度质量约为低碳钢材质接触轨的 1/3）、电阻率低、防腐性能好等优点，可以减少牵引变电所数量、减小电能损耗、节省运营成本。因此，虽然目前复合轨的一次性投资比低碳钢材质接触轨高，但采用复合轨已逐渐成为一种趋势，国内新建的接触轨系统均采用了复合轨。

接触轨受流在世界各国得到广泛应用，如伦敦、巴黎、柏林、莫斯科、巴塞罗那、纽约、旧金山、东京、汉城、北京、武汉和天津等城市。绝大多数采用接触轨方式地铁的电压等级不高于 DC1000V，电压在 DC1000V 及以上的地铁也有，如旧金山地铁（DC1000V）、巴塞罗那地铁 3、4 号线（DC1200V）、巴塞罗那地铁 1 号线（DC1500V）。

架空接触网分为柔性架空接触网和刚性架空接触网两种。接触网架设在线路上方，电动车组通过受电弓接触取电。柔性架空接触网在干线电气化铁路普遍采用，在城市轨道交通工程中也得到广泛应用，如用于广州地铁一号线，上海地铁 1、2 号线和明珠线，深圳地铁一期工程，大连快轨，长春轻轨等工程。

刚性架空接触网主要用于城市轨道交通工程的地下区段，如广州地铁 2、3 号线和广佛线，南京地铁 1、2 号线，上海市城市轨道交通 7、8、9 号和 11 号线等工程。相对于地下柔性架空接触网，它具有结构简单、导线磨损均匀、可靠性高（采用无张力架设，无断线、钻弓等事故隐患）、维护工作量小、维修周期长等优点。

随着城市客运流量的增大，需要大功率的车辆，要求降低运营能耗和杂散电流影响，而采用较高的供电电压可满足要求，故 DC1500V 架空接触网方式发展较快，已成为目前城市轨道交通牵引供电系统的发展趋势。日本等发达国家近年新建的城市轨道交通，牵引供电制式基本采用 DC1500V 架空接触网方式。香港的三条地铁线路，上海地铁和轻轨，广州地铁 1、2、3 号线和广佛线，深圳地铁一期工程，南京地铁 1、2 号线也都采用了 DC1500V 架空接触网方式。

近年来，随着国内社会的发展、科技的进步以及城市轨道交通的全面发展，人们对城市景观的要求也逐步提高，国内少数城市如广州地铁 4、5、6 号线和深圳地铁 3 号线，已开始进行 DC1500V 接触轨供电方式的研究与实施。

2.6.2 架空接触网

2.6.2.1 地下区段接触网悬挂方式

为了节省隧道净空，减少土建投资，城市轨道交通工程地下区段的架空接触网悬挂主要有弓形腕臂结构的简单链形悬挂（图 2.5-35）、弹性支座结构的简单悬挂（图 2.5-36）

和Ⅱ形结构的架空刚性悬挂(图2.5-37)三种形式。

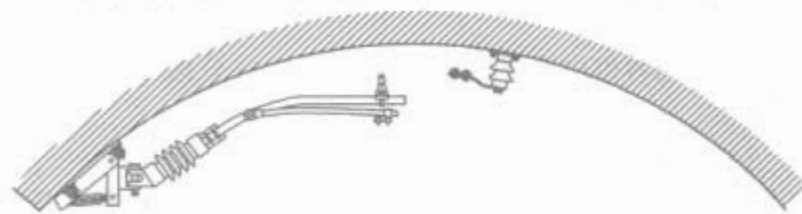


图 2.5-35 简单链形悬挂 (弓形腕臂结构)

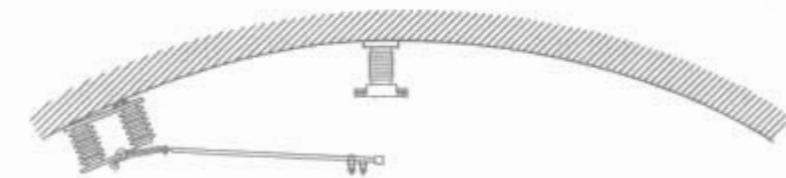


图 2.5-36 简单悬挂 (弹性支座结构)

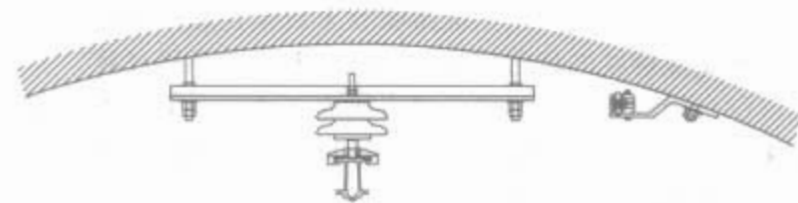


图 2.5-37 架空刚性悬挂 (Ⅱ形结构)

简单链形悬挂采用弓形腕臂结构,缩小了接触网的结构高度,减小了对隧道净空的需求。其结构高度最小值一般为235mm,跨距一般不大于25m,锚段长度一般不大于1500m。为满足接触网持续载流量的要求,需增设辅助馈线与接触悬挂并联。广州地铁1号线、深圳地铁一期工程采用了该悬挂方式。

弹性简单悬挂采用具有弹性的支持装置,即用弹性支座

来悬挂和定位接触线。弹性支座不仅用于定位接触线,还要承受接触线的质量,因此,接触网的跨距一般为10~12m,锚段长度一般不大于1500m。由于弹性支座仅能支撑2根接触线,在载流截面不能满足大电流的需要时,需增设辅助馈线与接触悬挂并联。上海地铁1、2号线和明珠线工程均采用了该悬挂方式。

架空刚性悬挂由一根Ⅱ形铝合金汇流排和一根接触线组成,利用铝合金汇流排自身的弹性固定接触线,支持结构一般采用垂直悬挂结构。架空刚性悬挂的悬挂点间距一般为8m左右(最高速度为80km/h时),锚段长度一般为250m左右。由于铝合金汇流排载流量很大,不需要增设辅助馈线。广州地铁2、3号线和广佛线,南京地铁1、2号线,上海市城市轨道交通7、8、9号和11号线等工程的地下区段采用了该悬挂方式。

以上三种接触网悬挂方式的技术经济比较见表2.5-51。

上述三种悬挂方式技术成熟、工作可靠,在城市轨道交通工程中均有采用。

2.6.2.2 正线地面区段(含高架)接触网悬挂方式

地面区段(含高架)采用的架空接触网通常有全补偿简单链形悬挂和补偿弹性简单悬挂两种。由于正线电动车组运行速度快、取流大,故正线地面区段(含高架)一般采用全补偿简单链形悬挂。

2.6.2.3 车场(含车辆段和停车场)接触网悬挂方式

车场(含车辆段和停车场)接触网悬挂方式按出入线、试车线和其他区分。

(1) 出入线是正线与车辆段、停车场线路之间的过渡,也是车辆段、停车场牵引变电所退出运行时,正线牵引变电所向车辆段、停车场接触网越区供电的通路。车辆段(停车场)出入线接触网一般采用与正线一致的悬挂形式,即隧道

表 2.5-51 接触网悬挂方式技术经济比较

悬挂类型	简单链形悬挂	弹性简单悬挂	架空刚性悬挂
悬挂结构	1) 悬挂组成: 2 根接触线+1 根承力索+3 根辅助馈线 2) 支持装置: 弓形腕臂 (或直腕臂) 3) 导线张力: 接触线 11kN; 承力索 14kN; 辅助馈线最大张力 12kN 4) 接触线和承力索设置张力自动补偿装置	1) 悬挂组成: 2 根接触线+4 根辅助馈线 2) 支持装置: 弹性支座 3) 导线张力: 接触线 11kN; 辅助馈线最大张力 12kN 4) 接触线设置张力自动补偿装置	1) 悬挂组成: 汇流排接触线各 1 根 2) 支持装置: 垂直 (或水平) 悬挂 3) 汇流排及接触线采用无张力架设, 无需设置张力自动补偿装置
隧道净空	大	小	较小
受流质量	弹性均匀, 受流质量好	悬挂点弹性好, 受流质量较好	无特殊硬点, 受流质量好
允许车速	允许高速	≤80km/h	120~140km/h
导线磨损	允许磨损小, 磨损均匀	允许磨损小, 磨损不均匀	允许磨损大, 磨损均匀
可靠性	存在钻弓、断线隐患	存在钻弓、断线隐患	无钻弓、断线隐患
设计手段	成熟	成熟	成熟
施工工艺	工艺较复杂	工艺较复杂	工艺简单, 施工要求高
运营维护	需常调整、维修维护量大	需常调整、维修维护量大	维修周期长, 维护量小
施工难易程度	工程实施较困难	工程实施较困难	工程实施方便
国产化程度	除分段绝缘器外其余设备均实现国产化	除分段绝缘器、弹性支座外其余设备均实现国产化	除分段绝缘器外其余设备均实现国产化
土建费用	局部开挖, 增加土建费用	局部开挖, 增加土建费用	不需要局部开挖
造价比例	1.01	1.28	1.0

内区段采用架空Ⅱ形刚性悬挂。地面区段采用全补偿简单链形悬挂。

(2) 试车线用于电动车组的动态调试,在确保电动车组的牵引和制动性能等各项指标合格后,进入正线运营,一般采用与正线地面(含高架)区段相同的悬挂形式,即全补偿简单链形悬挂。

(3) 车辆段内其余线路由于电动车组运行速度低、取流小,一般采用补偿弹性简单悬挂。

2.6.2.4 接触网主要技术标准:

(1) 架空刚性悬挂主要技术标准:

1) 悬挂类型。采用Ⅱ形铝合金汇流排与银铜合金接触线构成的刚性悬挂。

2) 导线高度。一般为4040mm,困难地段不小于4000mm。

3) 跨距。刚性悬挂跨距是指汇流排两相邻支撑点间距,曲线区段一般为6~8m,直线区段一般为8~10m。

4) 拉出值。一个锚段长度内的拉出值一般为200~250mm。

5) 锚段长度。一般为200~250m。锚段两端设置汇流排终端,锚段间采用平行重叠的关节方式,非绝缘关节设置电连接,每个锚段中部设置中心锚结。

6) 绝缘距离。带电体距接地体的距离,静态为150mm,动态为100mm,绝对最小动态60mm。

7) 绝缘等级。按重污区标准考虑,绝缘子的泄漏距离不小于250mm。

(2) 架空柔性悬挂主要技术标准:

1) 悬挂类型。正线地面(含高架)区段、车场出入线地面段和试车线采用全补偿简单链形悬挂,车场内其余线路采用补偿弹性简单悬挂。

2) 导线高度。正线地面(含高架)区段接触线悬挂点距轨面连线的高度一般为4600mm,最低不得低于4400mm(隧道口过渡段除外);车场接触线悬挂点距轨面连线的高度一般为5000mm。当需要改变时,其坡度变化应不大于5%。

3) 结构高度。链型悬挂的结构高度一般为1000mm。

4) 拉出值。直线区段一般为200mm,曲线区段不大于250mm。

5) 跨距长度。简单链形悬挂最大跨距不大于50m;弹性简单悬挂最大跨距不大于40m。

6) 锚段长度。一般不超过1500m。当锚段长度>750m时,两端均设自动张力补偿装置,并在锚段中部设中心锚结;当锚段长度≤750m时,锚段一端设自动补偿装置,另一端设硬锚。补偿装置应具有断线制动功能。

7) 侧面限界。必须满足限界专业要求。

8) 绝缘距离。带电体距接地体的距离,静态为150mm,动态为100mm,绝对最小动态60mm。按重污区标准考虑,绝缘子泄漏距离不小于250mm。

(3) 供电分段原则如下:

1) 正线接触网在下列地点设置电分段:

a. 有牵引变电所的车站(终端车站除外),在电动车组进站端设电分段。刚性架空接触网电分段采用绝缘锚段关节;柔性架空接触网电分段采用分段绝缘器。

b. 辅助线与正线衔接处设电分段,电分段采用分段绝缘器。

c. 正线间渡线设电分段,电分段采用分段绝缘器。

d. 车场与正线间设电分段,电分段采用分段绝缘器。

2) 车场接触网在下列地点设置电分段:

a. 车场内各库线入口处设电分段,电分段采用分段绝缘器。

b. 车场各供电分区之间设电分段,电分段采用分段绝缘器。

(4) 隔离开关设置原则如下:

1) 接触网馈电电缆通过隔离开关上网,上网隔离开关均采用电动隔离开关。

2) 正线各电分段之间的联络开关、车场出入线与正线的联络开关均采用电动隔离开关。

3) 车场各供电分区间的联络开关均采用电动隔离开关。

4) 车场各库线入口处的电分段均设带接地开关的手动隔离开关。

所有电动隔离开关均纳入远动控制。

(5) 刚柔过渡方案。地下刚性悬挂与地面柔性悬挂的过渡采用切槽汇流排贯通方式。在架空刚性悬挂的开始段,由刚性递减减小的切槽式汇流排吸收来自柔性悬挂接触线的振动,避免接触线的疲劳破坏,实现受电弓的平稳过渡。

(6) 接触网支柱形式。城市轨道交通工程架空柔性悬挂采用的支柱结构形式很多。其中锥形钢管柱具有截面小、质量小、强度高且受力无方向性、抗扭性能好、制造工艺简单、品质便于控制、价格适中、安装方便、线条流畅、外形美观等优点,因此得到广泛应用。

2.6.3 接触轨

接触轨由接触导电轨及其附件、有关电气设备及电缆等组成。

2.6.3.1 接触轨的安装位置

接触轨通常安装在线路的左侧,局部地段安装在右侧,如道岔区、小曲线半径地段。接触轨中心线距相邻走行轨内缘的水平距离为 (700 ± 5) mm。接触轨轨顶面距走行轨轨顶面的垂直距离为 (160 ± 5) mm。

2.6.3.2 接触轨截面

钢铝复合轨在截面、电阻以及载流量等各方面互相关联,有些产品的载流量过大,其实并不实用,反而造成设备浪费。在选择接触轨截面积时,应该按照系统接触轨的平均电流及合适的电阻来进行选择。

接触轨的电阻主要由铝质导体的横截面和电阻率决定,接触轨的电阻与截面积成反比,与温度成正比。图2.5-38(a)所示为接触轨载流量与环境温度的关系,图2.5-38(b)所示为接触轨截面积与电阻的关系。

2.6.3.3 接触轨长度

一般钢铝复合轨的制造长度约为15m,也可以达到18m。但接触轨长度太长,会增加运输成本;接触轨太短,又会增加鱼尾板的数量,使造价增加。

钢铝复合轨接触轨的连接为鱼尾板连接方式。接触轨的连接点距支撑件的距离应不小于225mm。为避免连接板与支撑点相冲突,接触轨的定长应是支撑点间距的整数倍。如果支撑点的距离定为5m,则接触轨的定长就可以选择为15m。

2.6.3.4 接触轨支架

接触轨支架可分为成套绝缘支架、分离式支架和绝缘子三种。

(1) 成套绝缘支架。成套绝缘支架是绝缘子与支架合而为一,全部采用复合材料制造而成。成套绝缘支架减少了预埋底座的数量,既有绝缘子的绝缘能力,同时也具有支撑防护罩的作用。成套绝缘支架具有安装间距大,节省工程数量的好处,适用于地下整体道床安装。成套支架对接触轨进行

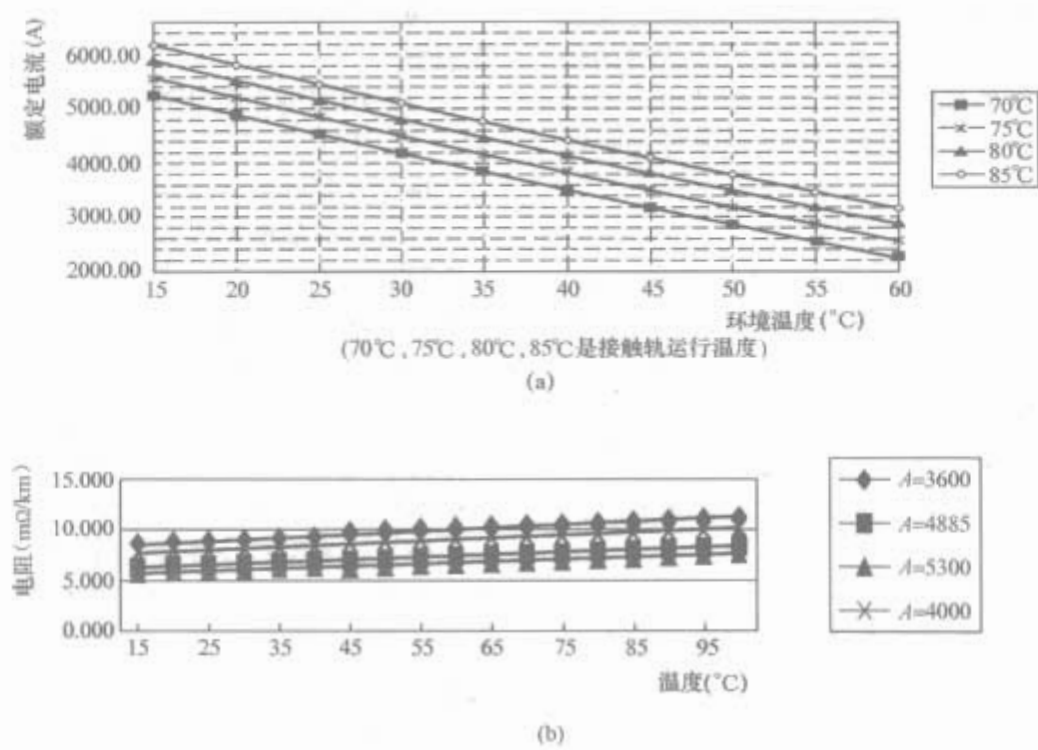


图 2.5-38 选择接触轨截面积的相关关系图

(a) 接触轨载流量与环境温度的关系；
(b) 接触轨截面积与电阻的关系 (A—铝质导体的横截面积，mm²)

支撑和定位，承受系统中所有动态、静态负荷。北京地铁 5 号线和 10 号线采用的就是这种支架。

成套支架可以承受轨的自重和放在轨上 150kg 的负荷所产生的机械力，也可以承受系统短路故障情况下的冲击。制造绝缘支架的材料应具有自熄、不燃的特点，并且在火焰中或高温条件下不会产生有毒气体。

(2) 分离式支架。分离式支架的支架与绝缘子分离，是两套独立的个体，一般用于低碳钢接触轨、碎石道床和车辆段。北京地铁 13 号线和地铁八通线工程就使用这种支架。

接触轨的挠度与质量以及支撑点间距的关系是

$$f_x(l) = \frac{ql^4}{384E_{al} I_{ynl}} \tag{2.5-56}$$

式中：l 为支撑点间距，m；q 为接触轨单位质量，N/m；E 为接触轨弹性模量，Pa；I 为转动惯量，kg·m²。

接触轨的挠度与接触轨的质量成正比，轨的质量越大，则轨的挠度越大。而将接触轨支架和防护罩固定在接触轨上，将会增加接触轨的质量，同时引起挠度的增加达 35%。如果再考虑其他如防护罩引起的转矩等影响，则要求减少支撑间距。钢铝复合轨由于质量小，具有固定间距增加的优势，一般推荐使用支架单独固定、防护罩固定在支架上的结构形式。

(3) 绝缘子。绝缘子对接触轨进行支撑和定位，承受系统中所有动态、静态负荷。要承受轨的自重和放在轨上 150kg 的负荷所产生的机械力及承受系统短路故障情况下的冲击。

绝缘子大多为瓷质，但在运输、安装以及运营时较易损坏。目前已经逐步开始使用复合材料的绝缘子。

2.6.3.5 跨距

钢铝复合轨质量小，接触轨的跨距比低碳钢接触轨长。考虑到复合轨自重引起的挠曲，一般跨距定在 5~6m 之间，而曲线段、道岔段、膨胀接头和弯头处的间距将有所减小。

2.6.3.6 防护罩

防护罩固定在支架上，防止触及接触轨而造成人员触电的危险。为保证人身安全，将在全线包括车站、车场和道岔

区安装防护罩。对防护罩的基本要求如下：

- 1) 防护罩的材料为 GRP（玻璃钢）。
- 2) 防护罩应具有一定的弹性，可以很方便地被安装、拆卸、更换。
- 3) 防护罩可以承载 150kg 重物，不会变形、损坏。
- 4) 防护罩的颜色一般为黄色或灰色。黄色较醒目，对防触电可以起到警示作用，但防紫外线的能力稍弱；灰色虽不醒目，但与环境协调，防紫外线的能力稍强。地下线路可不考虑防紫外线问题，从有利于安全的角度考虑，推荐使用黄色。

2.6.3.7 端部弯头

在车辆运行过程中，为使车辆的受流器可以完好地滑入/滑出接触轨，在断轨处设置弯头。钢铝复合轨一般有两种弯头。一种用在正线，为高速弯头，长 5.2m；一种用在停车场，为低速弯头，长 3.4m。制造弯头的材料与接触轨相同。弯头通过鱼尾板与接触轨连接，连接后的接触轨的性能指标不会发生变化。受流器通过弯头时，可以从弯头取流。

2.6.3.8 接触轨的连接

钢铝复合接触轨由鱼尾板在机械和电气方面连接，包括接触轨之间、接触轨与膨胀接头以及接触轨与弯头之间的连接。

鱼尾板的材质与制造接触轨的铝合金相同。在装配后，接触轨的机械强度和电阻不会受到影响。连接鱼尾板和接触轨的螺栓、螺母等零件都需要经过防腐处理，且具有足够强度。

2.6.3.9 膨胀接头

为补偿接触轨由于环境温度变化、接触轨本身的温升等条件影响而产生的热膨胀，在适当的位置设置膨胀接头。根据钢铝复合轨的热膨胀系数、膨胀接头的允许伸缩距离及接触轨允许温升，可以计算出膨胀接头的设置间距。

为使受流器可以平滑地通过，膨胀接头的表面应平整、光滑。膨胀接头应具有与接触轨相同的载流量。

2.6.3.10 锚结（防爬器）

两膨胀接头之间的接触轨中部要设锚结，以固定接触轨，使之可以在纵向两端自由伸缩。通常锚结安装在两膨胀接头或膨胀接头与弯头之间的接触轨的中部，短轨也应安装锚结。固定锚结的螺栓应是不锈钢材料，且应能承受加载在锚结上的应力。

2.6.3.11 电缆连接板

供电电缆连接的连接板应能安装在接触轨的任何位置，例如，牵引变电所出口、电分断或道岔处。连接板应有足够载流量，不会产生过热。

连接板应能提供足够多的单芯 185mm² 铜芯电缆的连接位置。一般连接板的材质都采用铝合金，为避免在安装铜芯电缆后发生电化学反应或腐蚀，可以采用铜铝过渡金属进行连接。

2.6.3.12 接触轨布置

(1) 正线牵引网布置。接触轨一般布置在车辆行车方向的左侧，在道岔区等个别地段布置在行车方向的右侧。在有牵引变电所的车站设置电分段，在线路道岔区接触轨分段（电不分段）。

对于准移动闭塞信号回路，牵引回流电缆接至信号轨道电路死区；对于移动闭塞信号回路，由于牵引回流电缆不受信号死区限制，可接至距离牵引变电所较近的位置。

具有检查坑的折返线，在检查坑区段前设置电分段及走行轨绝缘节，并通过检修开关柜同时接通（或断开）接触轨电源和走行轨回流。

(2) 车辆段牵引网布置。在车辆段与正线接口处接触轨设置电分段，走行轨设置绝缘节。通过开关柜同时接通（或断开）正线接触轨电源和正线走行轨回流与车辆段电源。在正常运行条件下，开关状态为开；当车辆段内的牵引变电所退出运行时，开关闭合，由相邻的正线牵引变电所向车辆段供电。

在车辆段内不同供电分区之间设置电分段。车辆段的接触轨采用单边供电方式。

在线路道岔区设置接触轨分段（电不分段）。作为牵引回流的走行轨应在供电回路的末端连接。

停车列检库的接触轨按车辆检修工艺布置，每股道每列车前设置一个直流手动隔离开关柜。为了保证检修人员的安全，在库内设置一台钢轨电位限制器。作为牵引回流的走行轨应全部连接，并接至钢轨电位限制器。

场区接触轨按少断轨的原则布置，且满足车辆专业的要求。在曲线半径小于 110m 的区段，接触轨布置在线路的外侧。

车辆段的出入段线由牵引变电所不同回路供电。

2.7 再生制动能量吸收装置

再生制动能量吸收装置是城轨交通供电系统的重要组成部分，对抑制地铁洞内温升、减少车载设备、降低车辆维修量带来了极大的方便。原地铁、轻轨车辆电制动采用再生制动或再生—电阻制动模式。对于车流密度不大的线路，再生电制动功能得不到充分发挥，造成气制动投入频繁，使得洞内或沿线闸瓦灰尘多，严重污染环境，并使地铁隧道内温度不断升高。为了降低电阻制动逸散在洞内的热量，工程中不得不加大洞内排、通风量或增大空调功率，造成工程建设费用及运营费用昂贵。再生制动吸收就是在牵引变电所设置集中吸收设备，使车辆再生能量消耗在地面空间。

列车进站制动时，首先进行再生制动。列车的再生制动

装置将列车的动能转变为电能反馈给牵引网，并使牵引网电压升高。为使电网电压升高不超过允许值，采用以下方式吸收能量：

(1) 相邻列车就近吸收。当列车发车时间间隔不大于 2min 时，同线路上运行取流的相邻列车可吸收再生制动能量。该方式最经济、实用。

(2) 电容储能形吸收装置。车辆进站制动、起动都将使电容储能装置进行一次充放电过程。在列车进行再生电制动导致牵引网电压升高时，超过电容储能装置设定的电压限值时，电容储能装置快速存储再生制动电能；当列车出站起动或加速时，牵引网电压下降，当低于电容储能装置设定的电压值时，电容储能装置快速释放存储的能量，提供给需要能量的列车。电容储能装置对牵引网电压具有一定稳定作用。

(3) 逆变型吸收装置。将牵引网上出现的过剩能量转换为交流电源，向车站动力、照明供电系统提供电源或由地面的能量吸收装置吸收。这里主要介绍地面逆变型再生制动能量吸收装置。

2.7.1 工作原理

运行的城轨车辆再生制动时，产生的能量反馈到电网上，会造成电网电压升高。当电网电压升高至一定限度时，牵引变电所内的再生能量吸收装置自动投入工作，将车辆再生制动所产生的能量消耗掉，以达到抑制电网电压过高、保证车辆安全运行的目的。

吸收装置有恒压吸收和逆变吸收两种方式。恒压吸收装置采用斩波器与吸收电阻配合，根据再生制动时线网电压的变化状态调节斩波器导通比，从而改变吸收功率，将线网电压恒定在某一设定值范围内。逆变吸收装置则利用电力电子器件构成的四象限变流器，将直流电逆变成工频交流电馈送至交流电网。由于该交流电谐波分量较大，因此必须设置谐波抑制器和功率补偿器。国内现多采用恒压吸收方式。

恒压式再生制动能量吸收系统原理电路见图 2.5-39。主电路主要由电动隔离开关（QS）、高速开关（KM）、滤波装置（L、C）、吸收电阻（R）、IGBT 斩波器、续流二极管（VD1）、电流传感器、电压传感器等元器件组成。

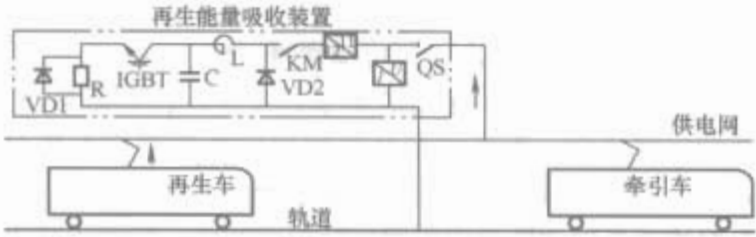


图 2.5-39 恒压式再生制动能量吸收系统原理图

注意当车辆处于起动、加速、惰行、停站或电网无车辆运行时，再生制动能量吸收系统不得投入工作。

2.7.2 主要技术参数

1500/750V 直流供电系统吸收装置主要技术参数见表 2.5-52。

表 2.5-52 1500/750V 直流供电系统吸收装置主要技术参数

参 数	1500V 系统	750V 系统
额定直流电压（V）	1500	750
电网直流电压波动范围（V）	1000~1850	500~1000
额定吸收功率（kW）	480	
主回路冲击耐受电压（1.5/50μs）（kV）	12	7
主回路工频耐受电压（kV）	5	3.8
辅助回路工频耐受电压（kV）	2	2
辅助直流电源电压（V）	110	110

2.7.3 结构

能量吸收装置由制动控制柜和制动电阻柜构成。制动控制柜采用自然风冷式、户内型设备,包括电动隔离开关柜和斩波器柜。电动隔离开关柜内主要设置电动隔离开关、接触器、滤波电抗器和滤波电容器;斩波器柜内主要设置斩波器。电阻柜由无骨架长波型的非磁性铬镍合金电阻元件、吊挂结构等组成。要求电感量低、电阻值温度漂移变化小、耐受温度高。

2.7.4 微机控制系统

能量吸收装置采用双微机控制方式。上位机为系统管理及监控、接受变电所综合自动化系统的各项指令;执行设备的投入、撤除、试验等操作,自动记录各种牵引和制动电压、电流及吸收电流曲线等;通过通信口与变电所自动化系统进行数据交换,对吸收设备进行实时监控,并实现当地与远方控制功能;通过触摸液晶显示屏及键盘,完成参数的设置、运行状态监视、故障判断及处理、数据记忆及外部打印等功能。下位机主要执行判断、斩波器投入、调节等功能。根据交、直流电压的变化进行综合判断,确定在线车辆已处于再生制动状况后,开通各相斩波器。根据牵引网再生反馈电流的大小,自动调节斩波器的导通角,改变各相电阻等效阻值,实现吸收功率平衡,稳定电网电压。当车辆由再生电制动转为其他工况运行时,经系统判断,自动关断各相斩波器,使吸收设备处于待命状态。

2.8 杂散电流腐蚀防护与接地

杂散电流腐蚀防护系统由杂散电流排流系统和杂散电流监测系统组成,对轨道、结构、供电、通信、信号、动力照明、给排水等部分需要提出杂散电流腐蚀防护的要求。

系统应按照“以防为主”的原则,采取防护措施降低杂散电流。同时为了避免长期运行后杂散电流泄漏量过大,还要采取相应的排流措施。除道床排流网外,可在工程中通过结构钢筋的焊接构成杂散电流监测网。

2.8.1 杂散电流腐蚀防护与接地的基本原则

杂散电流腐蚀防护系统的设计按照“以防为主,以排为辅,防排结合,加强监测”的原则进行。包括“防、排、测”三方面内容,应充分体现以防为主的特点。

(1)“防”。隔离、控制所有杂散电流可能的泄漏途径,尽量减小回流系统的阻抗,提高回流轨对地过渡电阻,抑制回流轨对地电流漏泄值。

(2)“排”。设置有效的杂散电流排流网。杂散电流排流网是杂散电流泄漏后遇到的电阻较小的回流通路,用于尽量将杂散电流限制在地铁内部,阻止其继续向地铁系统以外的地方泄漏。

(3)“测”。设置完备的杂散电流监测系统,对杂散电流漏泄量进行监测,为轨道交通的正常运行、维护提供参考数据。

此外,还应注意:①在保证杂散电流腐蚀防护成功实施的基础上,尽量减少投资;②当杂散电流腐蚀防护设计与接地安全发生矛盾时,应优先考虑接地安全;③地铁区间具有多种结构形式如高架段、地下盾构段和地下明挖段,杂散电流防护应根据地铁区间的结构形式,采用合理的技术方案,满足杂散电流腐蚀的防护要求;④地铁走行轨和直流设备采用绝缘安装;⑤对整体道床内的结构钢筋进行电气连接,建立杂散电流排流网;⑥对地铁明挖隧道区间、车站结构内钢筋进行电气连接,建立辅助杂散电流监测网;⑦建立杂散电流监测系统应包括参比电极、道床排流网测试端子和

隧道排流网测试端子;⑧由地铁外部引入地铁内部或由地铁内部引出地铁的金属管线均应进行绝缘处理;⑨每一个车站设一个外引共用接地装置,并与结构钢筋绝缘引入,接地装置接地电阻不大于 0.5Ω ;⑩在正线隧道出口处设置单向导通装置;⑪在地铁盾构区间采用隔离法对盾构管片结构钢筋进行防护。

2.8.2 杂散电流腐蚀防护措施

杂散电流是一种环境污染,如防护措施不力,将对地下结构钢筋和地下金属管网造成严重损害。杂散电流的防护要与建筑、结构、轨道、给排水、通信、信号、直流供电设备等相关专业密切配合,在相关专业技术和工程实施可行的基础上,采用可实施的、可靠的杂散电流防护措施。

杂散电流腐蚀的防护是一个长期的过程,存在于地铁工程设计、施工、运营等各个不同的阶段。需要在不同的阶段,根据杂散电流腐蚀防护的特点,对区间、车站、车辆段的各个专业提出不同的防护要求。

2.8.2.1 工程设计阶段采取的杂散电流腐蚀防护措施

杂散电流腐蚀的防护需要采取措施减小杂散电流值、降低回流轨电阻、提高回流轨对地过渡电阻。设计过程中可以采取以下具体防护措施:

(1) 轨道专业杂散电流防护措施:

1) 为减少走行轨纵向电阻,正线走行轨应采用重轨(60kg/m),并采用无缝钢轨敷设。

2) 对于车辆段走行轨,钢轨接头除了用鱼尾板螺栓连接外,还应在2根钢轨之间用2根 240mm^2 以上的绝缘铜电缆连接。

3) 正线(回流轨)道岔之间的电气连接应使用2根绝缘铜芯电缆,电缆截面积不小于 240mm^2 。

4) 轨道道岔使用绝缘扣件,道岔转辙机金属铠装控制电缆应有绝缘外护套。穿越道床的所有管线应采用绝缘塑料管或外部涂绝缘层的金属管。

5) 钢轨采用绝缘法安装。

6) 走行轨与轨枕之间应垫有绝缘橡胶垫板。而且轨枕上的道钉及其扣件和走行轨都应有绝缘件隔离,以加强轨道对地的绝缘。

7) 整体道床纵向结构钢筋在两端变形缝处 200mm 以内,用 $50\text{mm}\times 8\text{mm}$ 镀锌扁钢作为箍筋与所有纵向钢筋焊为一体,并引出整体道床表面。用 95mm^2 以上绝缘电缆,将所有引出道床表面的连接端子连接成排流钢筋网。

8) 在牵引变电所回流点附近,用 $50\text{mm}\times 8\text{mm}$ 镀锌扁钢作为箍筋与所有纵向钢筋焊为一体,并引出整体道床表面,作为道床排流网钢筋排流端子。

9) 为减少杂散电流,整体道床结构钢筋与任何钢筋(轨枕承台、隧道底板、高架桥面钢筋等)均应保持 50mm 以上距离。

10) 道床面至承轨面的间隙应不小于 30mm 。

11) 道床在设计过程中应考虑有效的排水措施,使走行轨和道床内不受积水侵蚀。

12) 正线与出入车辆段的走行钢轨之间以及电化股道的走行轨与非电化股道的走行轨之间,地下线与地上线走行轨之间以及车辆段维修轨与其他路轨之间设置绝缘节进行隔离,并根据实际情况设置单向导通装置。

(2) 给排水专业杂散电流防护措施。各种金属管线沿地铁主体结构敷设时,所有支、托架生根处或预埋结构内金属实体均不得与杂散电流道床排流网相碰。具体做法遵循以下原则:

1) 尽量将水管等金属管线设置于远离走行轨的地方。

2) 尽量采用绝缘材料制作的管子。

3) 车辆段内给排水管道宜采用绝缘性能好的塑料管;如果采用金属管道,则应对管道进行绝缘处理。进出车辆段的给排水管在进出车辆段的部位设置绝缘法兰或绝缘短管,与城市管网在电气上隔离。

(3) 供电系统及变电所专业杂散电流防护采取下列措施:

1) 在没有牵引变电所的车站及区间上、下行回流轨之间均设均流线(均流线间距需要与信号系统协调确定)。

2) 所有直流开关柜、整流柜、负极柜等设备均应采用绝缘安装,并设框架漏电保护。

3) 所有车站变电所均设轨道电位限制器,将走行轨对地电位限制在90V以下。

4) 低压配电系统接地保护型式为TN-S。

5) 牵引变电所应留有杂散电流监测装置所需位置,箱体可在变电所侧壁安装,外形尺寸约为500mm×500mm×200mm(长×宽×高),并为之提供电源。牵引变电所应预留排流柜安装所需场地及孔洞,并提供电源。

6) 车辆段应根据接触轨分段情况设牵引回流回路,使牵引电流就近回流。

7) 车辆段内线路密集区段,在车库内两侧轨道间加设均流电缆。

(4) 通信、信号专业杂散电流防护措施。信号专业应与有关专业配合确定上、下行正线及车辆段均流线和回流线具体连接位置,以符合信号专业要求。

(5) 动力照明专业杂散电流防护措施。车辆段内电气配线管采用PVC管。

(6) 结构专业杂散电流防护措施。通过隧道钢筋合理焊接,使隧道钢筋监测网截面大于道床钢筋排流网截面,这样当杂散电流流过隧道结构钢筋时,所引起的电位偏移数值小于整体道床排流网结构钢筋的电位差,从而保证地铁结构钢筋极化电压的正向偏移值控制在危害指标以下。

具体焊接要求如下:

1) 将结构内表层钢筋合理焊接形成杂散电流监测网。

2) 监测网纵向钢筋搭接时,应进行搭接焊。

3) 监测网每隔10m将一根横向钢筋与隧道底板及底板以上1.8m范围内的所有表层纵向钢筋焊接,形成一个网络。

4) 在每一段结构段的两端变形缝或沉降缝处附近,用50mm×8mm的镀锌扁钢在距离轨面1m的高度,与结构钢筋焊接并引出结构表面,作为电气连接和杂散电流监测之用。

5) 在地下车站范围内,在进出站信号机附近的隧道侧壁上距离轨面1m的高度,从隧道结构钢筋引出杂散电流测量/排流端子,作为监测/排流之用。

6) 对于盾构区间结构钢筋采用绝缘法进行杂散电流防护,即相邻盾构管片钢筋不进行电气连接,盾构管片间进行绝缘处理,同时必须保证管片间防水材料有良好的电气绝缘性能。

为保证杂散电流监测网的畅通,将盾构区间相邻车站的结构钢筋通过电缆进行连接,使全线杂散电流辅助监测网连续、完整。

7) 在车站建筑结构的变形缝附近,将结构钢筋焊接引出结构表面,作为杂散电流连接端子。

(7) 车辆段杂散电流防护方案。车辆段是轨道交通系统

中比较特殊的地段,车辆段在地面区段采用碎石道床,车辆多为空载,取流较小,杂散电流泄漏量也相对较小。根据车辆段本身上述特点,轨道下不敷设排流网。

2.8.2.2 工程实施过程中杂散电流腐蚀防护措施及工程的验收与检查

(1) 轨道及道床采取下列防护措施:

1) 正线走行轨在焊接成长轨时应符合CJJ 49—1992《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》第4.2.9条要求。

2) 走行轨与轨枕之间应垫有绝缘橡胶垫板。轨枕上的道钉及其扣件和走行轨都应有绝缘件隔离,以加强轨道对地的绝缘。施工时要保证这些绝缘件的完好。

3) 工程验收时需要测量回流走行轨的过渡电阻,检查轨道铜引线焊接质量,测量轨道连接部位的电阻,测试绝缘节的绝缘电阻。

(2) 给排水专业防护措施。各种金属管线沿地铁主体结构敷设时,所有支、托架生根处或预埋结构内金属实体均不得与杂散电流道床排流网相碰。具体做法遵循以下原则:

1) 尽量将水管等金属管线设置于远离走行轨的地方。敷设在道床表面的各种金属管线利用素水泥墩支托,管线与支墩之间必须加设绝缘垫层。

2) 在金属管线敷设过程中,管线与金属实体(包括安装支架和钢筋等)相碰时,应在管线与金属实体之间加设绝缘垫层。

3) 敷设在轨道道床下的与道床交叉的管道,在交叉段管道应采用塑料管或外涂绝缘防腐材料的金属管。

4) 工程验收时要测试所有绝缘接头的绝缘电阻。

(3) 供电系统及变电所专业防护措施。牵引变电所负极回流电缆通过回流箱与回流轨焊接牢固,焊接接头电阻不应超过1m长轨道电阻值;所有直流开关柜、整流柜、负极柜等设备均应采用绝缘安装。安装过程中要保证绝缘的完好;工程验收时要测试牵引变电所负回流母线及均流线的绝缘电阻。

(4) 通信、信号方面。工程验收时,要检查所有通信、信号设备金属外壳不得与钢轨及杂散电流排流网有任何电气连接。

(5) 结构方面采取下列措施:

1) 要保证隐蔽工程中结构施工单位能够按照杂散电流防护提出的要求进行焊接。

2) 对于盾构区间,结构钢筋采用绝缘法进行杂散电流防护,即相邻盾构管片钢筋不进行电气连接,盾构管片间进行绝缘处理,同时必须保证管片间防水材料有良好的电气绝缘性能。

2.8.2.3 地铁运营后需采取的杂散电流腐蚀防护措施

(1) 测量回流走行轨的过渡电阻。此检查措施需要在投入运行12个月以内及运行中每2年进行一次,也可根据需要随时进行。

(2) 提高回流轨对地的过渡电阻是杂散电流防护最根本的途径。线路建设初期,过渡电阻不得小于15Ωkm,线路运行时不应小于3Ωkm。

(3) 测量回流走行轨的平均电压曲线。此检查措施需要在投入运行12个月以内进行一次,也可根据需要随时进行。

(4) 检查轨道铜引线的焊接质量。此检查措施需要在运行中每季度进行一次。

(5) 测量轨道连接部位的电阻。此检查措施需要在运行中每2年进行一次,也可根据需要随时进行。

(6) 测量所有绝缘接头的绝缘电阻。此检查措施需要在

运行中每2年进行一次,也可根据需要随时进行。

(7) 测量牵引变电所负回流母线及股道间均流线的绝缘电阻。此检查措施需要在运行中每2年进行一次,也可根据需要随时进行。

(8) 检查水管、电缆等在隧道及高架桥上的敷设情况。此检查措施需要在运行中每2年进行一次,也可根据需要随时进行。

(9) 检查套管、绝缘法兰的状态并测量其绝缘电阻。此检查措施需要在运行中每2年进行一次,也可根据需要随时进行。

上述措施都是保证杂散电流防护工程实现的基本保证,若在运营过程中上述检查、测试出现问题,必须立即采取相应的解决措施。

2.8.3 杂散电流排流系统

尽管采取防护措施可以防止杂散电流的泄漏,但是由于走行轨和道床不可能完全绝缘,仍然有杂散电流通过道床向其他地区泄漏。因此有必要将流入道床的杂散电流通过一定电气通道将其回收到变电所内,以减少对沿线结构钢筋及金属管线的腐蚀程度,即加强排流网的设置。

排流网系统为杂散电流泄漏后遇到的电阻较小的回流通路,可以将杂散电流引至各牵引变电所负母排,从而将杂散电流限制在本系统内部,阻止其继续向地铁系统以外的地方泄漏。

2.8.3.1 道床排流网的设置

为保护整体道床结构钢筋不受杂散电流腐蚀及减少杂散电路扩散,利用整体道床内的钢筋进行电气连接,形成电气通路,建立起杂散电流的排流网。杂散电流从钢轨流向道床后,通过排流网并经排流柜流回牵引变电所。

通过合理地选择钢筋排流网钢筋截面,可使杂散电流流过钢筋时引起的对地电位偏移数值小于+500mV,保证道床结构钢筋极化电压的正向偏移值控制在危害指标以下,从而保护道床结构钢筋。

杂散电流排流网的截面,应根据运行高峰小时的车流密度、牵引供电计算及线路特征参数进行计算,经校核,排流网极化最高电位应在低于CJJ 49—1992的规定要求后确定。

排流网截面大小根据道床结构钢筋的实际布置情况、高峰小时钢轨平均电流、钢轨纵向电阻及泄漏电阻等参数,参照英国杂散电流防护规范《直流牵引系统引起的杂散电流影响的防护规程》进行排流网极化电压的正向偏移值计算,以满足《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》CJJ 49—1992规定的0.5V以下的要求。

计算表明,道床结构钢筋排流网截面大于2200mm²,即可达到全线轨道钢筋极化电位小于0.5V。

2.8.3.2 道床钢筋排流

利用结构钢筋设置杂散电流监测网,主要用于检测杂散电流的泄漏情况。在特殊情况下,如杂散电流排流网腐蚀严重无法满足排流要求时,此监测网也可以作为排流网使用。

在牵引变电所附近设置道床结构钢筋排流端子,为将来轨道绝缘降低、杂散电流增大预留排流条件。

2.8.3.3 排流装置

在每个牵引变电所内设置排流柜,通过电缆与直流开关柜负母排相连。通过对排流网结构钢筋极化电位数值的检测,确定是否对排流网开启单向导通装置,以使排流网内杂散电流回流至直流负母线,从而避免杂散电流对地铁系统的金属腐蚀。

2.8.4 杂散电流监测

地铁杂散电流的大小是随着自然条件的变化而变化的,

与运行时间的长短、轨道绝缘的好坏和牵引电流的大小有关。

杂散电流的监测,就是测量车站的结构钢筋极化电压偏移值和道床结构钢筋极化电压偏移值。并以此电压作为判定杂散电流防护措施是否有效及杂散电流对结构钢筋有无腐蚀的判定依据。杂散电流的监测由杂散电流监测系统与杂散电流监测网两部分组成。杂散电流监测系统通过检测网来采集结构钢筋的杂散电流监测数据。

2.8.4.1 杂散电流监测系统组成及要求

杂散电流监测系统由参比电极、道床钢筋测试引出端点、结构钢筋测试引出端点、钢轨测试引出端点、传感器、信号转接器、监测装置等组成。监测系统的数据可以实时上传给综合监控系统。为降低工程投资并随时监测杂散电流防护系统的状况,将杂散电流监测数据纳入综合监控系统统一进行管理。

要求在车站的适当位置设置杂散电流信号转接器,通过通信电缆将该车站及两端区间的传感器采集到的原始数据引入,信号转接器进行地址处理后再上传到监测装置;监测装置将数据保留并上传到综合监控系统,再通过通信信道传输至控制中心,将杂散电流信息分检后输入到杂散电流监测系统上位机进行数据显示及管理。

杂散电流信号转接器为小型化设备,可固定在监测点附近的墙上,外形尺寸为300mm×200mm×250mm(长×宽×高)。信号转接器采集2个数据量,即结构钢筋极化电压和道床结构钢筋极化电压。

信号转接器通过传感器经电缆分别与结构钢筋监测端子、道床结构钢筋监测端子和参比电极连接。

为保证杂散电流防护设施正常使用,应根据防护监测的情况对杂散电流各项防护指标进行维护性检查测量。检查测量内容应包括走行轨对结构钢筋过渡电阻、走行轨对道床钢筋过渡电阻、金属管线接头电阻和钢筋极化电位、自然本底电位等。

2.8.4.2 结构钢筋杂散电流监测网

为保证行车安全,减少杂散电流对走行轨固定金属部件的腐蚀及避免杂散电流对结构钢筋及结构外金属管线的腐蚀,采用将隧道及高架桥结构钢筋网作为杂散电流监测网的方法对杂散电流泄漏进行监测。

结构钢筋杂散电流监测网由建筑结构内部的结构钢筋构成。结构钢筋通过焊接构成电气连通的低阻抗回路,并在结构伸缩缝或沉降缝两侧引出连接端子,以截面不小于95mm²绝缘电缆相互连接成连续的网络。

杂散电流监测系统通过结构钢筋杂散电流监测网可以监测到由于杂散电流引起结构钢筋的极化电位。当监测到结构钢筋网的极化电位超过规程的要求时,说明走行轨对地绝缘已不符合杂散电流防护的要求。此时,应对轨道加强检查、清扫、维护及修复工作,恢复轨道与道床之间良好的绝缘状态,限制并降低杂散电流向地铁外部的泄漏。

2.8.4.3 监测点设置

杂散电流监测点的设置应能够保证测量道床钢筋对标准电极的电位及结构主体结构钢筋对标准电极电位。参比电极是测量大地基准电位的重要元件,测量所用参比电极应设在与被测点接近的位置。

(1) 隧道内监测点设置。每个车站上、下行线道床排流网各设4个测试点,共设8个。对于整体结构钢筋相连的地下车站隧道侧壁结构钢筋,设置4个测试点。

以上各监测点设置地点为进站处、出站处、车站外前后

200m处。

(2) 监测系统设备电源。信号转接器为杂散电流监测装置中信号传输的设备,安装于车站两端。监测系统中设置在区间的传感器及信号转接器通过与相关专业协商由轨旁设备区间动力配电箱提供电源,车站内的杂散电流设备由变电所提供电源。

2.8.5 接地系统方式

综合接地系统由全线所有车站共用接地装置构成,共用接地装置不但要满足供电系统工作接地要求、安全接地要求和屏蔽要求,还要满足地面及高架车站的防雷要求和杂散电流的防护要求,并应保证地铁能长期、安全地使用,防止或降低地铁乘客或地铁职员在供电系统发生故障时产生电击危险的可能性。

2.8.5.1 共用接地装置

(1) 接地网。车站变电所、停车场变电所或车辆段变电所单独设置一个接地网,接地网的接地电阻应不大于 0.5Ω 。

(2) 地下车站接地线。地下车站接地网设3组接地引出端子。每组引出端子间距不小于20m。一组接地引出端子接变电所接地母排,另一组引出端子接车站其他系统设备(弱电系统)接地母排,余下一组备用或接车站另一端变电所。每组引出端子包括两个接地引出端子。

变电所接地母排设在变电所内,供变电所电气设备工作接地和保护接地及变电所综合监控系统设备的屏蔽接地。从变电所接地母排引出2条接地电缆接车站设备接地母排。车站设备接地母排设在车站站台板下,供车站电气设备作等电位联结,如BAS、FAS、空调及给排水金属管线。

从接地网引出1组接地引出端子接车站弱电系统接地母排,弱电系统接地母排的位置由弱电专业指定,供车站弱电设备的工作或屏蔽接地。

2.8.5.2 接地安全

(1) 综合接地系统设计应充分考虑进入接地系统的接地故障电流的影响,接地系统应能承受接地故障电流的冲击。

(2) 在高压供电设备发生接地故障时,接地故障电压不应应对低压电气设备造成危害。

(3) 接地网的接地电阻、接触电压及跨步电压应在允许范围以内。

2.8.6 杂散电流与接地的关系

为防止地铁杂散电流通过PE线和外引接地体引向外界,综合接地网、车站及区间内的所有电气设备的金属外壳、各类金属管线等均与地铁主体结构钢筋采用绝缘法安装或敷设,即上述设备不得与主体结构钢筋相接触。

当等电位要求与杂散电流腐蚀防护出现冲突时,必须将人的安全放在首位,即优先满足等电位的要求,兼顾杂散电流腐蚀防护的要求。如安装轨道电位限制装置,当走行轨电位过高时,从优先考虑人身安全出发,应通过轨道电位限制装置闭合将走行轨接地,以避免人体接触过高电压。

2.9 电力监控系统

电力监控系统(电力SCADA系统)又称为远动系统,是在供电系统设备如断路器、隔离开关及其他设备信息的远程状态监视、远程控制的需求基础上发展起来的。

集成电路技术、单片/单板计算机技术的发展及操作终端计算机在我国快速普及和应用,为电力监控系统技术的应用发展提供了技术保障,使其应用走向新的阶段和高度。电力监控系统通常在变电所内部设置一套RTU(Remote Terminal Unit)系统。该系统是以计算机设备为核心的。系

统具有外部开关量接入、开关量输出、模拟量信息(通常为 $4\sim 20\text{mA}$ 、 $0\sim 10\text{V}$)接入等功能,可以对断路器、隔离开关等位置状态信号进行采集,对可以控制的开关进行分/合操作控制,对变压器及电容器组的抽头位置进行控制及调整。同时,通过变送器对电压、电流一次数值进行采集后通过RTU内部进行简单的处理,按照设定的通信规约打包送至调度中心(或控制中心)。

电力监控系统现在已经发展成为一个计算机应用系统,它具有信息完整、快速、准确等特点。对使用部门而言,可以提高工作人员的工作效率,使他们能正确掌握系统运行状态,加快决策,帮助使用人员快速诊断出系统故障状态,对提高电网运行的可靠性、安全性与经济效益,减轻调度员的负担,提高调度的效率和水平等方面有着不可替代的作用。现在,电力监控系统已经成为电力调度不可缺少的工具。

近年来,随着我国城市轨道交通事业的快速发展,电力监控系统在城市轨道交通行业已经得到了全面的应用和推广。国内目前各个城市新建的轨道交通项目均采用了电力监控系统,如已投入运行的系统有北京地铁13号线,广州地铁线,深圳地铁线,上海地铁1、2号线和明珠线,大连快轨3号线,武汉轨道交通1号线一期工程,天津市区至滨海快速轨道交通等。

2.9.1 电力监控系统的硬件设备配置

电力监控系统是一个分层分布式的自动化系统。对于城市轨道交通行业,电力监控系统是由设在控制中心(OCC)的控制站、设在沿线的主变电所、牵引降压混合变电所综合自动化系统、降压变电所内的综合自动化系统、远动通道、维修基地的复示终端系统组成。

这里主要介绍变电所内的电力监控系统。

变电所内的电力监控系统又称为变电所综合自动化系统。它是用于完成变电所内的远动数据的采集、信息的发送、接收和控制命令的执行。变电所内电力监控系统主要由变电所管理层、变电所现场通信网络、智能单元间隔层装置组成。

2.9.1.1 变电所管理层

变电所管理层是实现对本车站变电所设备的监视、报警功能,并负责变电所自动化系统与电力监控系统之间的数据交换。变电所管理层作为变电所自动化系统的通信控制、后台机系统,承担着变电所综合自动化系统的通信管理、人机界面(MMI)交互以及运行管理的任务。变电所管理层的规模是可变的。有人值班管理方式下,可设人机界面工作站。该工作站运行相应的管理程序,对系统进行运行状态监视、遥控(遥调)操作,也可以对系统进行设置。这样变电所自动化系统实质就是一个当地的、小型的SCADA系统。在无人值班管理方式下,变电所管理层的设备保留通信控制器即可,通信控制器上预留接口(串行口或以太网口),以便维护便携式计算机接入对系统进行调试。

变电所管理层设备包括监视工作站、通信控制器、交换机、UPS、综合控制屏、智能测控单元(含DI/DO/AI模块)等设备。

(1) 监视工作站。监视工作站安装变电所自动化系统应用软件,用于提供变电所自动化系统的人机操作界面。工作人员可以通过此工作站监视变电所内各类供电系统设备的工作状态、报警信号等。监视工作站应为工业级主流产品。

(2) 通信控制器。通信控制器用于实现各类智能单元间隔层与监视工作站、电力监控系统之间的通信传输,接收控制中心/车站控制室指令,向智能单元间隔层发布指令,收

集并处理从智能单元间隔层采集到的各类信息。通信控制器应采用通用性强的实时多任务操作系统,其性能应该满足现场环境的要求,产品应为工业级产品。

通信控制器配置2个用于远程通信的10/100M自适应以太网RJ45口,分别接入2台交换机。正常时,主通信接口处于工作状态,当主通信接口或主通道故障时,自动启动备用通信接口,使用备用通道。

(3) 综合控制屏。综合控制屏用于集中放置站内管理层、网络通信层设备,同时为这些设备提供工作电源。综合控制屏配有音响报警设备,当所内发生预告报警、事故报警时,可以通过不同的方式引起管理人员的注意。综合控制屏内配有用于显示电动隔离开关分、合状态的指示灯。指示灯与音响报警设备共用测试转换开关,用于指示灯、音响报警装置的测试。综合控制屏一般安装在变电所控制室内,与变电所交直流电源屏并排安装。屏体防护等级一般为IP4X级,选用高强度钢组合结构,屏体钢板厚度2.5mm,屏体采用全封闭结构,表面采用喷塑处理。屏体尺寸为800mm×600mm×2260mm,结构为前后开门、垂直自立式的柜式结构,正面采用玻璃保护屏,左、右侧采用可拆卸的挡板。

(4) 智能测控单元。变电所自动化系统设一套智能测控单元,安装于综合控制屏内。智能测控单元可通过输入、输出模块与一次设备的二次无源接点连接,采集一次设备的数据或向其发送控制指令。

2.9.1.2 变电所现场通信网络

各种智能单元间隔层装置通过现场通信网络进行连接组成变电所综合自动化系统,实现变电所内管理层与智能单元间隔层之间的通信。变电所内数据通信层包括智能单元间隔层与通信控制器之间的通信光缆、电缆及光电转换装置。

智能单元间隔层装置通信网络一般使用总线型通信,总线型的通信方式因其传输距离长、节省连接电缆的特点而广泛应用。但在变电所内部集成的装置种类比较多,各种装置的总线形式不一,以一个普通的地铁变电所为例,可能同时有MODBUS、MODBUS PLUS、PROFIBUS-DP、PROFIBUS-FMS、LONWORKS、CANBUS等总线协议以及以太网等物理接口,甚至还有装置厂家专利的通信协议。

2.9.1.3 智能单元间隔层

智能单元间隔层设备主要是指微机保护测控装置、测控单元、变压器温控器、PLC等带有智能通信接口的设备,例如交流10kV(或35kV)微机保护、直流微机保护、400V系统测控设备、智能采集装置、变压器温控装置、钢轨电位器、交/直流屏充电测控装置等。这些智能设备与供电系统设备的控制/检测回路、TV、TA等二次设备连接,负责执行通信控制器对供电系统设备的控制、监视、测量、保护等,实现对基础设备数据的采集、测量等功能。智能单元间隔层设备的最大特点是具有智能化的、自律性能的微机化单元,其基本功能的运行不依赖通信网络。例如,微机保护测控单元,其保护功能的实现是通过对该线路的电压、电流、开关状态等参数的采集并经过保护装置内部运算后输出信号控制开关的工作过程。

(1) 牵引降压混合变电所的智能单元间隔层主要包括以下设备:10(35)kV综合测控保护装置,750(1500)V直流保护装置,400V智能监控装置,牵引变压器温控箱,配电变压器温控箱,牵引整流器智能采集装置,电动隔离开关柜智能采集装置,轨道电位限制器智能采集装置,排流柜(含杂散电流监测装置),交直流电源智能采集装置,10(35)kV计量装置,电容储能装置。

(2) 降压变电所的智能单元间隔层主要包括以下设备:10(35)kV综合测控保护装置,400V智能监控装置,配电变压器温控箱,轨道电位限制器智能采集装置,交直流电源智能采集装置,10(35)kV计量装置。

2.9.2 电力监控系统的基本构成

城市轨道交通系统的变电所包括牵引降压混合变电所、降压变电所和跟随式变电所。

变电所自动化系统包括间隔层设备(保护、测控装置)、网络层和管理层三大部分。间隔层按照设备性质不同可分为交流系统(10kV或35kV保护测控装置)、牵引系统(750V或1500V直流保护测控装置)、低压交流系统(0.4kV测控装置)和其他系统(如电源屏控制机、变压器温控器装置等)。上述三种类型变电所自动化系统中,牵引降压混合变电所自动化系统最为典型。降压变电所自动化系统与牵引降压混合变电所自动化系统基本相同,但不含直流牵引系统的测控。跟随所自动化系统其所内部分与降压变电所自动化系统基本相同。下面以牵引降压混合变电所为例,描述变电所自动化系统的构成。

变电所综合自动化系统,按无人值班设计的分布式系统,系统由所级管理层、网络通信层、间隔设备层这三部分组成。

所级管理层由控制信号屏及设置在其内的通信控制器、显示设备、音响报警装置等设备组成。

间隔层设备包括分散安装在各交流10(35)kV开关柜、直流750(1500)V开关柜内的间隔层保护测控设备以及控制信号盘上集中安装的接触轨/网电动隔离开关测控单元(注:因系统主接线形式及自动化控制理念的不同,有些项目设置了电动隔离开关测控单元,有些项目则没有单独设置,在此先按照该测控单元存在考虑,且将其划分为间隔层设备,只是安装位置在控制信号屏上,利用通信接口与通信控制器连接)。

变电所自动化系统的控制方式采用远动控制、所内集中控制、设备本体控制三级控制方式,正常运行时采用远动控制,当设备检修时采用所内集中控制或设备本体控制。一般在开关柜上设当地/远方选择开关,对于接触轨/网电动隔离开关,在控制信号盘上设置当地/远方转换开关和相应的合分闸开关。三种控制方式相互闭锁,以达到安全控制的目的。

典型牵引降压变电所自动化系统结构如图2.5-40所示。

2.9.3 电力监控系统的功能

2.9.3.1 遥控

只能遥控本站设备。遥控权限通过权限授予与收回或上交实现由电力调度到其他级别操作员的传递。

2.9.3.2 遥信功能

将本站设备位置状态遥信上传本站操作员站。变电所自动化系统采集变电所内各种装置的遥信信息,包括位置遥信和保护遥信。遥信信息在人机界面上实时刷新,以便操作员及时了解现场设备运行状态。

位置遥信包括各种断路器、隔离开关、接触器等设备的合、分状态,断路器手车的工作、试验、抽出位置状态等。

保护遥信包括各类保护跳闸动作、重合闸动作的起动、出口、失败等信息,分为事故遥信和预告遥信。事故遥信指使设备停电、停运的事故信号。预告遥信指不影响设备继续运行的故障信号。

遥信点变位描述可按用户要求定义,系统按遥信的类型分类定义变位描述,用户也可进行自定义描述。

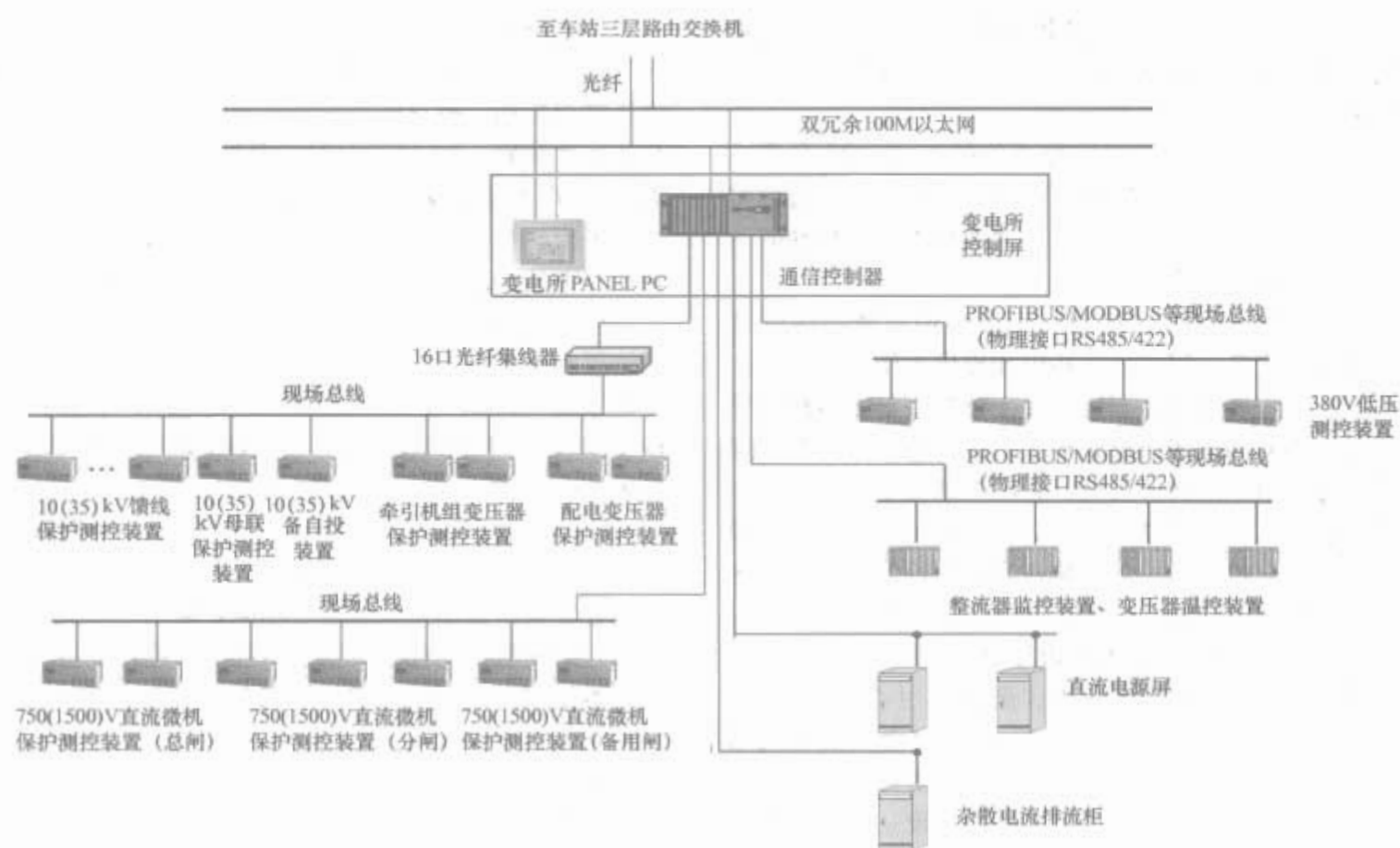


图 2.5-40 典型牵引降压变电所自动化系统结构图

系统可定义给出变电所自动化系统计算机节点的工作状态、网络运行状态、通道运行状态等虚拟遥信点。

2.9.3.3 遥测功能

将本站设备遥测信息上传本站操作员站。系统采集本变电所内各类监测对象的交流相/线电压，交流电流，零序电压，零序电流，直流电压，直流电流，有功与无功功率，谐波，功率因数，蓄电池电压，变压器温度等电气量。

遥测可以周期方式进行采集（最小采集周期为 1s），也可以由电力调度中心召唤遥测。

(1) 零点嵌位（近零死区的处理）。可在数据库中设置一个近零死区，如果遥测值在近零死区范围内，则可嵌位成零（下限值）。当采集点的绝对值在归零死区内时，视该点数据为零值。

(2) 遥测信号的传送死区处理。按周期采集的遥测信号，可以定义变化传送死区。每个周期采集时，如果定义了变化死区传送，则只有当本次数据与上次传送的数据之差超过了遥测量变化死区时，数据才传送到控制中心和车站控制室。

2.9.3.4 操作员强制（人工置数）和禁止处理

本功能变电所与监控中心相同，具有权限的操作员可在变电所操作员站对本站设备遥信点的状态和遥测点的数值进行强制（人工置数）和禁止处理。

2.9.3.5 保护装置信息查询

可查询本车站变电所的各保护装置信息。

2.9.3.6 供电系统软件联锁功能

与监控中心相同，根据供电系统的运行方式，系统软件定义本站设备之间的联锁关系，以保证开关操作的正确性。联锁功能调度人员不能进行撤除。

2.9.3.7 图形画面

与监控中心相同，具有权限的操作员可在本站操作员站上进行本站图形的组态、修改和绘制。人机界面是维护人员日常监控、操作的主界面，由运行监控程序和其他辅助程序的模块组成。主要提供如下功能：

- (1) 调度画面显示、调度员常用操作等功能。
- (2) 人机操作接口提供窗口管理、画面显示及操作等功能。
- (3) 在人机界面可进行相关程序起动操作。
- (4) 对系统历史数据进行查询。
- (5) 系统可显示供电系统图、牵引网系统图、各变电所主接线图、停送电程控画面、报警/预告画面及其他画面等。具体画面包括（但不限于以下内容）：①工程线路示意图；②供电系统示意图；③本车站变电所供电设备分布示意图；④本车站变电所自动化构成示意图；⑤本车站变电所主接线和接触网线路图；⑥程控显示画面；⑦遥测曲线画面；⑧电能能量直方图；⑨越限统计报表；⑩操作记录报表；⑪报警/预告信息画面；⑫变电所自动化系统网络拓扑图。

2.9.3.8 信息处理和显示

站内操作员站应显示各基础设备监控单元上送的本站各设备的实时信息，并上送监控中心。

2.9.3.9 报警

与监控中心一致，只记录本站报警，并可由站内值班员复归站内报警，但不能影响中心报警。中心报警必须由电力调度员复归。

- (1) 报警功能。系统设备发生故障或异常时，自动发出各类预告/事故报警信号。
- (2) 人机界面报警显示。供电系统设备或者变电所自动化系统发生故障时，在变电所人机界面上自动推出报警画面（画面可由用户自定义）。报警应该分为多级，不同级别的报警定义不同的显示方式，如：一般性报警信息在报警列表采用高亮度或醒目颜色显示；重要报警信息自动推出报警画面（画面可由用户自定义）。报警发生后，值班员必须通过界面上的确认按钮确认；否则报警信息一直在列表顶端或者人机界面最前端。

(3) 综合控制屏音响报警。综合控制屏配置电笛或者电铃等音响报警装置。当报警发生时，综合控制屏内的监视工作站驱动音响报警装置发出报警信号。报警声音分为事故、

预告两种类型, 应该有明显区别。报警音响可以通过人机界面复归、手动复归和自动复归(延时 15s~3min 后自动停止报警, 时间可调, 调整步长 15s)。用户可以选择其中一种或者多种复归方式。综合控制屏设置报警设备投入/退出/测试转换开关。

2.9.3.10 数据处理

具有权限的操作员可在变电所内使用数据处理功能。变电所自动化系统能对各种采集的数据进行算术及逻辑处理, 并将最新的故障报警信息及 SOE 事件记录信息数据存储在变电所监视工作站的历史数据库中。最新故障报警信息及 SOE 事件记录信息存储量不少于 10000 条。

2.9.3.11 事故追忆功能

功能要求与中心相同。可对站内设备进行模拟量事故追忆和开关量事故追忆。

2.9.3.12 SOE 事件记录

功能要求与中心相同。存储本站 SOE(事件顺序)记录, 并可以以各种方式(按时间、按事故源对象等)查询。事件顺序记录主要用于分辨事件发生的先后顺序, 任何开关点均可以设置为 SOE 方式。通信控制器的 SOE 时标分辨率优于 1s。事件顺序记录的内容不能被任何人、用任何方法进行修改。

2.9.3.13 故障录波数据记录

功能要求与中心相同。当本站各种保护装置规定的保护事故跳闸时, 系统自动记录事故跳闸的原因、时间及相关模拟量和开关量的状态信息, 并可以各种方式查询。

2.9.3.14 日志功能

功能要求与中心相同。系统根据遥信点变位自动生成本站各种日志, 并可以按各种方式查询。

2.9.3.15 趋势曲线

系统提供本站各模拟量由用户自定义趋势显示功能。遥测量(电压、电流、功率等)按定义的保存周期保存在历史数据库中; 曲线浏览程序根据每个模拟量保存的数据点, 按要求通过曲线方式显示出来。系统可以显示实时或者历史模拟量的趋势曲线(包括平均值、最大值、最小值等)。当进行实时趋势曲线显示时, 曲线按照一定周期自动刷新。可以选择曲线进行平移、无级缩放等操作。趋势曲线画面中同时显示的数量、曲线颜色、显示比例可以由用户自行定义。

2.9.3.16 软件在线维护、修改、扩展功能

功能要求与中心相同。具有权限的操作员、管理员可在线对本站数据库和画面等进行修改和维护。

2.9.3.17 中文信息传递功能

在系统中的任何一台计算机上都可以互相发送中文信息, 应支持点对点发送和群发功能。

2.9.3.18 帮助使用功能

系统附设帮助使用功能。帮助功能的内容可由用户与供货方共同制定, 帮助功能能够引导用户一步一步进行各种操作、画面组态、报表组态等。

2.9.3.19 信息查询

功能要求与中心相同。用户可在站内以各种方式对本站信息进行查询。

2.9.3.20 时钟同步

变电所自动化系统应具有与电力监控与环控集成系统时钟同步的功能, 使变电所自动化系统与控制中心的时钟保持同步。变电所自动化系统可对其监控的智能设备进行软件同步对时, 同步对时间隔时间应可调。

2.9.3.21 汉化功能

功能要求与中心相同。系统人机操作界面进行全中文处理。

2.9.3.22 系统容错能力、自诊断功能

功能要求与中心相同。站内操作员站、通信控制器等关键设备冗余配置, 并对站内各监控设备进行监视, 故障时报警并进入日志。

2.9.3.23 防病毒功能

系统安装防病毒软件, 对系统进行实时监控, 防止病毒对系统的攻击。

2.9.3.24 集成第三方软件及设备功能

系统应具有集成第三方软件及设备的功能。

2.9.3.25 接地状态显示

当现场供电设备接地开关处于接地位置或者现场设备由人工挂接地线时, 操作员可在主接线画面上设置接地挂牌标志, 同时自动闭锁与之相关的控制命令操作。接地状态显示当现场供电设备接地开关处于接地位置时, 系统自动在画面上做出明显标记(接地标志或挂接地牌), 同时自动闭锁与之相关的控制命令。

当现场设备由人工挂接地线时, 变电所自动化系统不能提供接地开关信息。此时变电所值班员在画面上采用手工方式做出明显标记。控制中心及车站控制室相关界面上应有相应的接地状态显示, 同时自动闭锁与之相关的控制命令。

2.9.3.26 冗余设备切换功能

站内系统中冗余设备应实现自动或手动切换功能, 功能要求与中心相同。双冗余的通信控制器、网络交换机及通信通道采用热备工作方式, 主用设备发生故障时可自动切换到备用设备。运行方式如下: 正常情况下指定 1 号单元为主用设备, 2 号单元处于热备用状态; 当 1 号单元退出运行时, 处于热备状态的 2 号单元立即投入使用。若 1 号单元故障修复后具备正常工作的条件, 1 号单元进入热备用状态, 2 号单元作为主用设备运行。两个单元之间的切换也可以通过人机界面上手动操作来实现。两个单元之间的切换时间不大于 5s。

2.9.3.27 供电管理系统功能

功能要求与中心相同。可实现对本站各种设备及资料的管理, 并可通过键盘等设备录入。

2.9.3.28 与便携式维护计算机通信功能

变电所自动化系统应配置与便携式维护计算机进行通信的接口, 由便携式维护计算机实现监控及维护功能。

2.9.3.29 应用软件登录管理功能

变电所自动化系统应用软件在起动、退出时均需要值班人员输入相关的用户名及密码。

2.9.3.30 便携式维护计算机功能

变电所维护计算机本身应具有控制及操作功能、数据采集与处理功能、显示功能、报警功能、维护功能等。配有专用的维护软件工具, 实现对变电所监控网络和测控保护装置的软件编程功能及日常维护。软件维护工具应包括图形界面维护工具、可视化顺控流程工具、灵活的系统配置工具、丰富的组态工具、远程诊断工具等, 并提供人机交互式界面。提供功能方块图、梯形图、顺序流程图等编程语言工具。使用编程语言对闭锁、程控等条件直观方便地进行编程, 并将条件代码下载至相应的通信控制器。下载过程具有多重校核保护措施, 并有下载操作记录。根据权限修改闭锁、程控等条件代码。

维护计算机应配置与通信控制器的标准通信接口, 维护人员只需将维护计算机与通信控制器维护接口相连, 利用提

供的软件维护工具调出、输入变电所自动化系统采集的数据及参数,即可自动完成对变电所自动化系统的维护。每台计算机功能应适用于全线的变电所。

维护计算机可安装变电所内各专业测控保护装置的专用维护软件,通过串口(如RS232)与单个保护装置连接,实现对单个保护装置的维护。

便携式维护计算机的应用软件在启动、退出时均需要维护人员输入相关的用户名及密码。

2.9.4 系统的接口

电力SCADA系统内部、外部接口较多,在变电所内部存在监控系统与10kV系统微机保护测控装置的接口、与直流750V系统微机保护测控装置的接口、与0.4kV监控单元的接口、变压器温控箱的接口、交直流屏的接口等。工程实践证明,接口工作在变电所自动化系统中是影响工程进度的一个重要因素。变电所内部的接口归纳起来有如下几种:

2.9.4.1 硬线接口

用信号电缆传递开关信号或模拟信号。

(1) DO。开关量输出,即电力监控系统集中式测控单元提供给相关系统的开关量输出信号,一般采用DC24V、DC48V、DC110V或DC220V有源电压信号和无源触点。触点为单独使用,不与其他系统共用。为运行维护的安全性和简便性,建议开关量输出使用无源触点。

(2) DI。开关量输入,即相关系统或装置提供给电力监控系统集中式测控单元的开关量输入信号。为运行维护的安全性和简便性,要求开关量输入使用无源触点,触点为单独使用,不与其他系统共用。

(3) AI。直流模拟量输入,即相关系统或装置提供给电力监控系统集中式测控单元的直流模拟量输入信号。模拟信号一般采用4~20mA电流或1~5V电压信号,一般建议采用4~20mA电流信号。

(4) AC。交流采样输入,即相关系统或装置提供给电力监控系统集中式测控单元的直流模拟量输入信号,主要是TV、TA二次侧交流量,一般采用5A或1A及100V输入。

2.9.4.2 串行数据接口

用数字通信的方式传递数据。使用RS232、RS422或RS485标准接口。通信速率由设备情况确定。建议采用开放的、被广泛使用的工业标准通信协议,如IEC60870-5-101、IEC60870-5-103、MODBUS、电力部颁CDT等。

2.9.4.3 现场工业总线网络接口

现在基本采用网络接口方式,如CANBUS、PROFIBUS-DP/FMS、RS485/422/232等。

2.9.5 接口规范性的分析

在轨道交通工程电力监控系统中,由于系统之间、车站监控系统与基础设备层自动化系统之间及基础设备层各子系统之间的接口问题十分重要,因此要求做到:①系统集成商具有较丰富的接口设计和接口管理经验;②系统集成商所设计的电力监控系统具有较强的集成功能,具有接入各种通信网络的能力;③具有对多种通信规约的转换接入能力;④具有对多厂家设备(第三方设备)的接入经验与能力。

2.9.5.1 接口管理原则

由于监控系统是一种高层监督控制系统,基础自动化层的设备种类众多,接口各异,厂家的技术实力参差不齐,作为电力监控系统厂家需要协助业主完成接口协调的工作,用规范的接口设计文件编写规范和测试大纲。在工程伊始,就要认真编写接口设计文件和后续的测试大纲,应仔细描述接口的分界、功能和测试的方法,实现接口的标准化和文件

化,以便于责任的划分和日后的维护。在工程实施中,要召开需要接入的子系统分类、分组组织设计联络会。这种设计联络会是多方的,包括业主、监理、设计、监控系统厂家和相关子系统厂家,共同确定功能需求和接口方案。考虑到SCADA系统几乎要与所有的电力设备进行接口设计联络,设计联络会议采用分组方式进行,电力监控系统厂家分别与各组供货商进行接口设计联络。

2.9.5.2 接口设计管理

(1) 接口类型标准化。为保证与其他系统的完全兼容,监控系统应配备不同类型的接口,同时为保证系统的维护简便,应尽量采用标准的接口类型。标准的含义有两种:①物理连接的标准化,例如接口是采用硬触点的方式还是通信的方式,如采用通信的方式,接口是采用RS485还是RS422或者其他;②指协议方面的标准化,如双方设备使用标准MODBUS、标准Profibus-DP等。

(2) 接口驱动标准化和可扩展性。采用标准化的通信接口驱动模块实现与现场设备的互联。监控系统应具有多种现场总线驱动模块,可以随意增减,并可以按照用户的实际需要编制新的接口驱动,实现其他系统的完全接入。以下是城市轨道交通电力系统常见的接口驱动:①MODBUS;②MODBUS PLUS;③PROFIBUS/FMS;④PROFIBUS-DP;⑤IEC60870-5-101;⑥IEC60870-5-103;⑦IEC60870-5-104;⑧CONTROLNET;⑨DEVICENET;⑩FF;⑪LONWORKS;⑫SPA-BUS;⑬CDT。

此外,对于具体工程中采用的其他接口形式,电力监控系统厂家应与相关厂商积极配合,开发相应的接口驱动程序,保证其顺利接入到监控系统。

2.9.6 软件平台的构成

2.9.6.1 系统应用软件

(1) 系统应用软件应是开放性的,用户在遵循操作规则的前提下,应可根据运营的要求,修改、增扩系统监控对象和应用画面。

(2) 用户画面窗口具有平滑缩放功能,缩放时画面上的各设备动态符号相对位置保持不变,且应是全图显示。

(3) 用户画面定义时应具有拷贝功能,且应询问是“相同”还是“不同”对象拷贝。

(4) 应用软件应具有带数据库定义的图形编辑工具。各种图形符号在定义时应具有平滑缩放功能。

(5) 各种图形符号在定义后,应自动检测电气连接的正确性,并给出提示信息。

(6) 各种记录(操作、警报)应可根据用户要求,按站名、对象、性质、时间等项目进行检索。

(7) 系统所有对象定义后,系统应能自动检测应定义而未定义的对象。

(8) 应用软件必须具有在线修改、增扩功能。

(9) 变电所监视工作站采用通用性强、简便易用、界面友好的实时多任务操作系统。

(10) 软件应配置综合测试和诊断软件包,可诊断所内各种设备故障,故障标志到模块级。

(11) 变电所自动化系统软件可以在控制中心进行远程维护。在控制中心内对变电所自动化系统进行数据及图形界面修改后,可以更新变电所自动化系统内的相关数据及图形界面。

(12) 所有应用软件应该具有友好的中文界面。

(13) 系统应用软件至少要包括人机界面模块、实时数据库模块、历史数据库模块、数据统计模块、事件浏览模

块、曲线浏览模块、报警管理模块和通信模块。

2.9.6.2 数据库软件

数据库分为实时数据库和历史数据库两部分。实时数据库应该具有高可靠性和数据的完整性及灵活的扩展结构，能满足用户的各种需求。历史数据库最少可存储 7 天变电所自动化系统的原始数据。并具有一定的权限管理功能，可根据权限范围分级使用。还应具有高速的数据存储和检索性能。

2.9.6.3 维护软件

维护软件应具有良好的开放性，支持用户二次开发。软件系统应运行可靠。

维护软件应包括图形界面维护工具、可视化顺控流程工具、灵活的系统配置工具、丰富的组态工具、远程诊断工具等，并提供人机交互式界面。应提供功能方块图、梯形图、顺序流程图等编程语言工具。可以使用编程语言对闭锁、程控等条件直观方便地进行编程，并将条件代码下载至相应的通信控制器。下载过程具有多重校核保护措施，并有下载操作记录。根据权限修改闭锁、程控等条件代码。

2.9.7 电力监控系统主要技术指标

总体要求遥控正确率大于或等于 99.99%；遥信正确率大于或等于 99.9%；模拟量测量总误差小于或等于 0.5%。

- (1) 系统显示实时性技术指标见表 2.5-53。
- (2) 系统事件分辨率（SOE）技术指标见表 2.5-54。
- (3) 系统数据传输率见表 2.5-55。
- (4) 系统切换时间技术指标见表 2.5-56。
- (5) 系统可靠性技术指标见表 2.5-57。
- (6) 系统容量见表 2.5-58。

表 2.5-53 系统显示实时性技术指标

参 数	指 标
遥控响应时间（s）	≤1
遥信响应时间（s）	≤2
遥测变化传送时间（s）	≤3
有事故画面的整幅推出时间（s）	≤5
开关变位报警推出时间（s）	≤3
画面响应时间（s）	≤1
动态显示刷新时间画面（s）	≤5
遥测总误差（%）	≤±1.5
遥测量死区最小整定值（%）	0.5~1（额定值的）
遥信量、遥控量正确率（%）	100
系统误码率	≤10~8

表 2.5-54 系统事件分辨率（SOE）技术指标

参 数	指 标
站内事件分辨率（ms）	≤5
微机保护测控装置（SOE）（ms）	≤1
站间事件分辨率（ms）	≤10

表 2.5-55 系统数据传输率

参 数	指 标
电力调度中心局域网络通信速率（Mbit/s）	≥100
通信通道传输速度（Mbit/s）	100
变电所内局域网络通信速率（Mbit/s）	≥10

表 2.5-56 系统切换时间技术指标

参 数	指 标
通道切换时间（s）	≤2
数据服务器切换时间（s）	≤3

表 2.5-57 系统可靠性技术指标

参 数	指 标
系统平均无故障工作时间（h）	≥25000
装置平均修复时间（h）	≤0.5
有效使用寿命（年）	≥20
系统可用率（%）	≥99.99

表 2.5-58 系 统 容 量

参 数	指 标
变电所综合自动化系统容量（每站）	≥5000
变电所综合自动化系统预留容量（%）	≥30
中央监控系统预留容量（%）	≥50

2.9.7.1 可维修性

系统的维修性是指可修复系统排除故障的难易程度。为了配合高可靠性的系统设备，以下几个方面亦应纳入设备选型原则的考虑。

(1) 系统的固有维修性。固有维修性是指系统在硬件和软件本身方面排除故障的难易程度，系统应有全面的自诊断功能，准确的故障指示功能及容易更换的模板。

(2) 维修的经济性。购买备品、备件的价格不应比原本提供的设备价格高很多。此外，设备修复的价格必须清楚显示更换板子还是更换元器件。

(3) 维修资源的获取方便程度。系统的备品、备件应该在国内容易获得，应保证货源及交款后短时间内可以得到备件。

(4) 系统设备是否将要停产。应避免提供将会在短期内停产的设备。如必须使用该产品，应提供包括停产后备品和备件能供应多长时间及是否有其他备件代替等资料。

2.9.7.2 系统的其他要求

(1) 系统的实用性。实用性的系统应具备对各信号处理的较高精度和较快速度，人机界面的友好性，汉字提示，丰富的报警功能，方便控制调节的操作，有效的报表处理和打印功能，系统接线较为方便，系统对操作环境要求不苛刻等。

(2) 系统的先进性。系统选型时必须考虑设备最新发展状况水平及采用先进的国际标准，最新体系结构发展潮流，先进软件平台及控制策略等。

(3) 系统的经济性。应考虑以下几个方面：

1) 系统本身的价格（包括系统本身、服务和培训等）。

2) 系统的体系结构不同而引起的信号源不同而带来费用差别，或因系统不同而引起的施工要求不同造成的费用差别。

(4) 系统的开放性。系统网络应具备开放性条件，所选的网络要符合国际标准化组织提出的标准协议及以下几个方面：

1) 硬件、软件、通信、操作系统、数据库管理系统等都应遵循标准或国际协议使系统能具有通用性。

2) 在控制级别和信号接口方面，应支持各种标准和流行的信号接口。

3) 系统应有现成的公用接口，接口软件应容易改造。

(5) 系统的成熟性。所采用的系统、设备应为在城市轨道交通工程电力 SCADA 监控系统或电力行业相关类似系统已应用的产品。

2.9.7.3 产品指标

硬件设备应具有防尘、防腐蚀、防潮、防霉、抗震、抗电磁干扰和静电干扰的能力。

所有光缆、通信电缆、控制电缆和相关设备选型满足《地铁设计规范》的要求；产品电磁兼容性能满足国家有关标准；产品绝缘强度及耐压性能满足国家有关标准；产品应通过工业控制设备安全标准 cUL 508。

2.9.7.4 系统使用环境条件

振动： $f \leq 10\text{Hz}$ 时，振幅为 0.3mm ； $10\text{Hz} < f < 150\text{Hz}$ 时，加速度为 0.1m/s^2 。

抗电磁干扰及无线电干扰能力：在 $27\text{MHz} \sim 1\text{GHz}$ 的范围内，可抵抗不少于 20V/m 的电磁场干扰；可抵抗无线电频率为 $50\text{kHz} \sim 27\text{MHz}$ 中的接触性干扰。

2.10 供电计算分析

2.10.1 牵引设备容量的估算

2.10.1.1 牵引负荷的特点

轨道交通列车牵引负荷与动力照明用电负荷不同，对于轨道交通供电系统某一个牵引变电所而言，列车牵引负荷是波动变化的、间断的负荷，而降压变电所承担的动力照明用电负荷相对是持续的、稳定的。轨道交通列车牵引负荷的特点是由电动列车在线路上的运行所决定的。

列车牵引负荷的变化特点由两方面的因素决定：①列车在线路上的运行时，从一座车站通过区间到达下一座车站有出站起动、取流加速、断电惰行、进站制动的过程，不同的过程使列车在两个车站之间的负荷具有波动性与间断性；②从行车组织的角度来看，一天的运营时间内，其行车密度是不尽相同的，如在早晚运行高峰，行车密度为 30对/h ，其他时间可以是 10对/h 或 20对/h 等，行车密度的不同使牵引负荷在一天中不同的运行时间内产生变化。

2.10.1.2 牵引容量的确定

在考虑牵引变电所中牵引设备容量时，一般以远期高峰小时、大双边供电情况下的牵引负荷作为设计依据，并可以按近远期以不同容量进行设备安装。牵引负荷容量与车辆类型、编组数量、行车密度等有关。

2.10.1.3 牵引设备容量的估算

设备容量的估算，基本上是根据现有众多工程实例得出的一种单位统计数据，负荷估算原则上都是单位指标法，因此单位指标的确定和修正，对于设备容量估算的准确性有决定性的作用。当然，不同的负荷特性有不同的单位指标，对于动力照明，可按每建筑平方米的指标进行设备容量估算；而牵引设备容量与电动车辆、线路长度、行车密度等有关，可按单位长度、质量的牵引负荷安装指标来进行牵引设备容量的估算。单位长度、质量牵引负荷安装指标是指一列车单位质量运行 1km 线路牵引设备的安装容量，即每吨公里的设备安装容量。按此方法只需要知道正线线路长度和一列车的定员质量就能够估算牵引设备容量。

2.10.2 牵引供电计算的平均运转量法

牵引供电计算在轨道交通直流牵引供电系统中占有很重要的地位，它的计算结果直接关系到牵引供电方式的构成、牵引变电所的分布及数量和牵引设备容量的确定。

牵引供电计算有平均运转量法和运行图法两种计算方法，其中运行图法也称为牵引供电仿真计算。两种计算方法

都可通过计算机来实现。

平均运转量法是建立在概率论的基础上，由前苏联教授罗真菲立特和柯斯特罗米琴结合工程实践用概率论推导出计算公式，并由唐山铁道学院曹建猷教授和昭能仁博士确认。

对于偶然出现的个体事件，很难找出其规律性，而观其大量的事件，从概率的角度，则有其规律性可寻。从统计定义来讲，观察或试验某一事件出现的频率，随着观察或试验次数的增加，出现的频率将呈现一定的稳定性。轨道交通的运行车辆，就某一列车而言，它可能处于出站起动状态、取流加速状态、断电惰行状态或进站制动状态；但对于一条运营线路来讲，有若干车辆在运行，它们不可能都处于一种状态，会有其中一些车辆处于某种相同状态。

按照平均运转量法进行牵引供电计算时，其主要参数的平均值与有效值之间的关系符合方差定律。具体参数有列车平均电流、列车有效电流、馈线平均电流、馈线有效电流、牵引变电所母线平均电流和牵引变电所母线有效电流。

计算假设条件如下：

(1) 馈电区间的列车数量不变，并等于平均列车数。

(2) 列车在线路上运行时，列车之间的相互位置受运行条件的制约，即不可能两列车重合在一起。

(3) 列车电流在区间是变化的，但运行区间列车的平均电流和有效电流是不变的，即对某区间来讲，以一定速度把一定质量的旅客从一个车站运送到另一座车站，其能耗是不变的。

根据行车组织的要求，轨道交通的行车密度为 $N\text{对/h}$ ，即每隔一定时间间隔发出一列车，因而列车在线路上的分布位置也基本是均匀的，因此用“平均”两字来形容轨道交通列车的运行是非常合适的，并且符合能量守恒定律。

采用平均运转量法计算牵引负荷和利用需要系数法计算动力照明负荷一样，采用的原理是一致的，由于列车的运行是按照运行图进行的，规律性更强，因此准确性也会更高。

平均运转量法最重要的计算基础是列车单位能耗，这是已运营线路的统计平均值，它基本决定了牵引供电计算的准确性。轨道交通采用的列车大多为 VVVF 电动列车，在列车设有空调的条件下，列车单位能耗可选择为 $0.075\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。

2.10.3 牵引供电计算的仿真算法

牵引供电计算的仿真计算方法利用运行图为基础进行牵引供电计算，要求必须具备详细的列车在各运行区间的运行图，列车的牵引特性曲线包括牵引曲线和制动曲线以及列车在区间的电流、速度曲线。

计算机仿真计算需要建立可靠有效的数学模型，计算条件必须真实，否则结果也难以准确。由仿真计算的条件可知，它不适合轨道交通工程初步设计阶段的前期设计。

牵引供电计算的两种方法适合于不同的阶段。平均运转量法适合于轨道交通工程的预可研、可研和初步设计阶段，并已证实满足工程实际需要。计算机的仿真计算方法适合于施工设计阶段对牵引供电系统具体重大问题的核算。在计算条件不能保证真实可靠的前提下，计算机的仿真计算方法是不适合的。

2.10.4 直流牵引供电短路计算

轨道交通直流牵引供电系统是由全线若干牵引变电所和牵引网组成的多直流供电点的供电网络，牵引变电所通过牵引网相互连接，因此当直流牵引供电系统发生短路时，全线的牵引变电所（直流供电点）都向短路点供电。

直流牵引供电方式不是唯一的，正线正常供电方式为双

边供电,但还有大双边供电和单边供电的运行方式。不同的运行方式对短路电流的大小有影响。

直流短路计算应包括三项内容:①牵引变电所内阻计算;②时间常数计算;③直流稳态短路电流和瞬时短路电流的计算。

2.10.4.1 牵引变电所的内阻

牵引变电所的内阻应包括交流中压电缆、牵引变压器、硅整流器和直流电缆的阻抗。牵引变电所的外特性为软特性,牵引变电所的内阻归根结底是外特性的斜率问题。因此在不同点短路,因短路电流不同,牵引变电所的内阻也不同。

2.10.4.2 时间常数

直流牵引供电回路中的时间常数与交流供电系统中的功率因数一样,都是反映回路中的电感量和电阻量关系的量值。在涉及直流开关设备的分断能力时,需要关注时间常数。

实际上,时间常数就是直流牵引供电回路中电感与电阻之比。按照直流回路短路电流变化的指数曲线,当电流上升至 $0.632I_k$ 时所需的时间,即为该回路的时间常数。

直流牵引网中的电阻比较容易得到,但要得到牵引网中的电感量比较困难,尤其对于地铁过去使用的低碳钢接触轨更是如此。因为低碳钢接触轨,走行轨与周围环境(钢筋)均为铁磁性物质,存在相互影响,因此牵引网中的电感不是一个常数,并且随着短路点距牵引变电所的距离和短路电流的大小不同而变化。时间常数可以通过短路电流的示波图进行计算得到。

2.10.4.3 直流短路计算的目的

进行直流短路计算有三个目的:①可以作为直流开关设备选型的依据,如计算线路首端所得最大短路电流 I_{kmax} 可作为校核直流快速断路器的固有动作时间极限分断能力的依据;②作为直流继电保护整定的依据,如计算线路末端所得最小短路电流 I_{kmin} 作为直流馈线保护的灵敏性校验依据;③作为轨道交通电动车辆主保护电器选择的依据。

2.10.4.4 直流稳态短路电流计算

为简化计算,直流短路电流的计算,有两个假设条件:①直流供电网络中牵引变电所的直流母线电压一致;②牵引变电所为电压源,变电所内阻随不同的短路点而变化。

直流稳态短路电流计算有两种不同的方法,即电路图计算法和示波图计算法。

(1) 电路图计算法。根据牵引供电系统的实际网络,画出等效电路图并进行网络变换,按照电工原理的基本定律(如欧姆定律、基尔霍夫电压电流定律)进行计算。直流稳态短路电流的计算假定直流供电网络中只含有电阻。

(2) 示波图计算法。根据现场短路试验实际拍摄的短路电流示波图,从示波图中截取不同点,从而得到不同的短路电流和时间,根据直流短路电流的变化特性,即可得到稳态短路电流。

在计算得到直流稳态短路电流和短路时间常数后,直流瞬态短路电流只要按照短路电流的变化公式,即可方便得到。

2.10.5 直流牵引供电系统继电保护整定

直流牵引供电系统的继电保护,除牵引整流机组由中压配电系统负责继电保护外,系统组成的直流开关设备、牵引网和电动列车,故障的可靠切除都属于直流牵引供电系统继电保护的工作内容。

2.10.5.1 直流牵引供电系统继电保护的设置

(1) 直流开关设备。直流开关设备故障包括开关柜直流母线短路、开关柜直流馈线故障、开关柜直流正极碰壳等。设置如下继电保护:

1) 直流进线开关的过电流保护,用于保护直流母线短路。

2) 框架泄漏电流保护,用于保护直流正极碰壳。

3) 馈线开关的过电流保护,用于保护直流馈线出口短路。

(2) 牵引网。牵引网的范围包括从直流开关柜的馈出开关下口开始,直流馈出电缆、上网开关柜、上网及回流电缆、接触网到回流网。

牵引网可能发生的电气故障有电缆线路的短路、牵引网的短路及接地、牵引网过负荷、过电压或欠电压等。设置如下继电保护:

1) 馈出开关的过电流保护,用于保护直流开关柜馈出开关下口近端大电流短路。

2) 电流速断保护,用于保护牵引变电所近端线路的金属性短路。

3) 电流增量保护,用于保护牵引变电所中远距离线路的金属性短路及电弧短路。

4) 过负荷保护,用于保护线路异常故障产生的过负荷。

5) 相邻牵引变电所同线路保护装置之间的双边联跳保护,作为过电流保护、电流增量保护的后备保护,用于消除馈出开关对牵引网的保护死区。

(3) 电动车辆。电动车辆自身设有电气保护,直流牵引供电系统与车辆电气保护存在相互配合的关系。电动车辆主电路直流快速开关的短路分断能力,应满足切断车辆内部最大短路电流的要求,并能在牵引变电所直流馈出开关动作前切断故障回路。

牵引变电所直流馈出开关设置的电流增量保护,可保护车辆主回路故障。设置的过电压、欠电压保护装置,用于保护系统异常运行时线路上产生的过电压或欠电压,保证车辆的正常运行。

2.10.5.2 继电保护的整定

直流牵引供电系统和交流供配电系统的继电保护设计原则是一致的,应满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性的要求。

继电保护装置的整定原则是:①要满足灵敏性的要求,在系统电气参数基本确定的情况下,保护整定值越低,灵敏系数越大,保护范围越大;②过电流整定值应使系统在正常运行时不误动作,即整定值应大于线路、设备的最大负荷电流。

对于系统电压较低的750V直流供电系统,在行车密度较高的情况下,最大负荷电流会与线路末端的短路电流接近,甚至超出末端短路电流,这就使继电保护的合理整定产生困难。可通过采取增大短路电流的措施或采用电流增量保护来解决。

(1) 进线开关的过电流保护整定。直流母线短路保护整定值应大于进线最大负荷电流。考虑各种误差因素,灵敏系数可选择为1.4。

(2) 框架泄漏电流保护。框架泄漏电流保护有两个整定值:一是电压整定值;二是电流整定值。电压整定作为系统报警,电流整定用于开关跳闸。电流的整定值应大于框架正常泄漏电流。电压整定值应大于大双边或末端单边运行方式时走行轨对地电压。

(3) 馈出开关过电流。整定值大于进入馈出回路最大的负荷电流,考虑各种误差因素,灵敏系数可选择为 1.4。

(4) 馈出开关电流速断。整定值大于进入馈出回路的最大负荷电流,考虑各种误差因素,灵敏系数可选择为 1.4;并宜小于馈出开关过电流整定值。

(5) 电流增量保护。电流增量保护作为设备、线路非金属短路的重要保护措施,保护灵敏系数应不低于 1.6。保护整定值有电流上升率 di/dt 、电流增量 ΔI 和时间间隔 Δt 等。电流和时间整定值不能单独起作用使开关跳闸,而必须综合作用才能使保护装置区别此时为故障状态还是车辆启动或其他情况的电流瞬间异常波动。

当电流上升率 di/dt 超过保护装置整定值,保护装置启动并开始计时,在此期间只有时间间隔 Δt_1 超过保护装置时间间隔整定时,相应直流馈出开关将跳闸。两个条件任一不满足,直流馈出开关将不会跳闸。

当电流增量 ΔI 超过保护装置整定值,保护装置启动并开始计时,在此期间只有时间间隔 Δt_2 超过保护装置时间间隔整定时,相应直流馈出开关将跳闸。两个条件任一不满足,直流馈出开关将不会跳闸。

在实际工程中,若列车最大启动电流上升率或电流增量已大于被保护线路末端故障的电流上升率或增量时,保护装置整定的时间间隔应大于列车的启动时最大电流上升率或电流增量的持续时间。

(6) 保护装置的过负荷。由于轨道交通车辆按照运行图运行,牵引负荷本身不会出现过负荷的情况。但在牵引网阻抗因特殊原因降低的情况下,系统可能出现过负荷,过负荷保护针对此类情况设置。

(7) 过电压、欠电压保护。应根据车辆牵引电动机的允许电压进行整定,以保护车辆牵引电机的正常运行,不致受到损坏。



第6章 通信信号与信息技术

1 概述

通信系统是轨道交通运营指挥、企业管理、机电自动化系统及服务乘客的网络平台,是轨道交通正常运转的神经系统,是覆盖轨道交通的重要基础设施之一。为了充分反映通信工程技术的发展,下面较全面地陈述轨道交通通信专业。本章的通信包括铁路通信及城市轨道交通通信两部分,其中铁路通信包括基础通信网络,以及调度通信、专用通信、站场通信、应急通信、视频监控、移动通信;城市轨道交通包括数字传输、无线、公务电话、专用电话、闭路电视监视、广播、时钟等系统。

轨道交通信号系统是保证行车安全、提高区间和车站通过能力及编解能力的手动与自动控制、远程控制技术及装备的总称。铁路信号可分为行车管理与监控和编组场控制两大技术门类,随着列车运行速度的提高,高速铁路与客运专线的大力建设,行车指挥与列车运行自动化技术已经全面进入了我国铁路信号体系。编组站作业自动化是提高铁路运输能力的重要手段。编组站自动化系统是指利用计算机控制编组站的作业过程和货车信息处理系统,对于城市轨道交通,其信号技术的重点是正线的列车自动控制系统。

积极发展我国列车运行控制系统(CTCS),不同速度的线路采用不同等级的技术装备的原则,是我国铁路的重要技术政策。各级CTCS尚在研究、完善、建立之中,尤其是建成高等级的CTCS,将会经历一段较长的时间。故此,本章对CTCS只限于最基本的描述。高速铁路信号系统是轨道交通信号系统的重要分支,根据高速铁路的运行特点,必须采用先进的列车控制、联锁、行车指挥等系统。由于我国的高速铁路、客运专线等尚处于研究与建设之中,缺乏成熟的工程经验及与其相适应的信号系统,故有关内容不纳入本章。

信息技术的发展带动了轨道交通行业整体技术的快速发展,信息技术几乎可以涵盖轨道交通系统中的所有自动化技术,通信信号的很多系统技术内容也可归入信息技术章节之中。考虑到各系统的发展现状和系统的完整性,本章的信息技术仅包括铁路运输管理信息系统(TMIS)、铁路列车调度指挥系统(TDCS)、城市轨道交通的综合监控(ISCS)等。

通信信号与信息技术涉及了轨道交通系统的行车组织与列车运行管理、机车车辆监控、综合调度系统、计算机及其网络技术、自动化控制技术等,其业务领域广泛,专业性极强。

2 通信

2.1 铁路通信系统

铁路通信是覆盖全路的重要基础设施,包括基础通信网络,以及调度通信、专用通信、站场通信、应急通信、视频监控、移动通信等系统。

2.1.1 通信网络基础平台

铁路通信网络基础平台为通信各应用网络及信息化各应用系统提供了公共的基础网络环境,满足了各运营管理部门

语音、数据、图像的业务传送和各应用系统互连互通和社会化服务的需求。系统主要由光传送网、移动通信网、数据通信网、电话网、会议电话电视网及辅助的支撑网络组成。

2.1.1.1 光传送网

由于光波具有极高的频率,可以承载巨大的信息量,因此几乎所有大的通信网络,无论是公网还是专网,均将光纤作为网络的主要传输媒介;由于光通信具有抗电气化铁路电磁干扰的巨大优势,故十几年来,光传送网一直是铁路通信网发展的重点。

铁路光缆从20世纪80年代开始筹划,90年代开始大规模建设。容量由最初的8芯发展到12芯、16芯、20芯和24芯。主要采用G.652光纤,结构为单元组合充油直埋式,现已覆盖了全国大部分铁路线,实现了光纤到车站的接入。为满足站间及区间通信的需求,在埋设光缆地段均同沟埋设了一条对称电缆,结构为多单元四芯组,容量为 $4 \times 4 \times 0.9-7 \times 4 \times 0.9$ 。一般线路光缆采用直埋方式,隧道中设置在预制管道或采用钢管或角钢对扣防护,桥上设预留管道或在桥栏杆外侧设置槽型钢制管道,一般在高速铁路及客运专线区段单独设置混凝土管道。上述区段为确保列车运行安全提供保护,一般敷设容量相同的光缆(例如20芯)两条,分别设于铁路的两侧,不再敷设贯通全线的电缆。光缆在进出车站时采用环引方式,在区间可采用分歧引入方式。

光传送网技术体制采用SDH,由骨干网及接入网两层组成。骨干层为SDH 2.5 Gbit/s,ADM节点设于大站并实现两层网的连接。各骨干层在铁路交叉点设置具有较大交叉连接能力的ADM设备,实现各线ADM设备的高阶数字口,如STM-1及STM-4的连接,组织光骨干网络及实现各线间的系统保护。在高速及客运专线区段将组织环状骨干网及接入网,以提高系统的可靠性。铁道部至路局的骨干网络一般采用DWDM骨干环传送,DWDM环节点少,并可提供自愈保护,提高了骨干网的可靠性。

光接入网采用SDH 622Mbit/s传输系统,ADM节点站设置,车站设置ONU接入设备,具有电话用户Z接口、音频二/四线接口、ISDN2B+D接口、数据传输速率为2Mbit/s及64kbit/s的接口。在设有电话交换机的大站设置OLT接入设备,通过V5.2接口与电话交换机,实现 $N \times 2$ Mbit/s的数字连接,并与ONU配合将各站的电话用户接入交换机。OLT和ONU设备均具有64kbit/s的交叉连接功能,为区段用户提供音频及数据专线,并将ISDN交换机的2B+D接口通过接入网延伸到车站用户。近年来,新设置的接入网ADM还具有MSTP功能,可提供ATM接入和以太网两层交换功能,为信息化各系统的计算机提供以太网接口,实现系统的联网。接入网的ADM节点将延伸到区间为设于区间的GSM-R基站、调度集中CTC区间信号点提供通道。

一般铁路线由于站间距离短,接入层SDH光口采用1310nm,高速或客运专线站间距离长可采用1550nm,骨干层2.5GSDH光口采用1550nm。光中继距离控制在80km,系统中节点一般不设置光中继器。

SDH 系统和接入网均需设置网管,在新线和客运专线还设置了光纤的远程监控,提供在线光纤的质量检测和断纤点的定位。

铁路光传送网(骨干+接入)系统如图 2.6-1 所示。

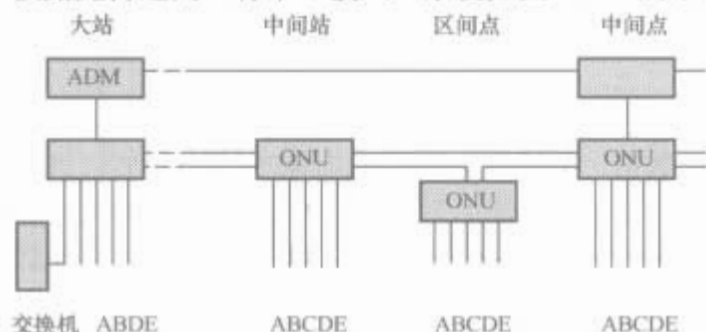


图 2.6-1 铁路光传送网(骨干+接入)系统

- 注 1. 区间点位于区间的信号机械室、无线基站、电力变电所。
2. 与交换机连接 $N \times 2\text{Mbit/s}$ V5.2 数字口。
3. 符号 A 为音频 2/4 线接口、B 为 64kbit/s 数据接口、C 为电话用户 Z 接口、D 为 2Mbit/s 专线接口、E 为 10M/100M 以太网接口。

2.1.1.2 移动通信网

铁路移动通信业务主要采用 800MHz GSM-R 技术体制和 450MHz 专用频道组织车—地通信系统,为地面人员—列车、列车—列车、地面人员之间提供安全、可靠、不间断的移动语音通信及数据通信。800MHz GSM-R 属于优先发展的蜂窝数字通信技术,对于高速铁路,采用无线技术实现列车控制具有重大意义,是现代铁路基础应用技术。

2.1.1.3 数据通信网

数据通信网是铁路信息化各应用系统的基础网络平台,随着铁路信息化的建设应运而生。1992 年,为了分布在全路的 TMIS1800 多个信源点联网,组建了 X.25 网;以后又发展了帧中继网及 ATM 骨干网。随着信息化各个系统的快速发展,铁路信息化总体规划的实施及 IP 技术的日益成熟,采用 IP 技术组织数据通信网络将成为铁路数据通信的发展方向。

为保证数据通信的安全可靠,将信息化各系统分成了两种组网类型,属于安全生产的,如运营调度、行车指挥、客票预售等系统,采用专线组织网络,形成各自独立的系统。其专线大多数为 $N \times 2\text{Mbit/s}$ 电路,采用环路或星型组网方式,由传送网的自愈环提供保护。属于内部服务的其他信息化系统,采用统一的网络平台。在此平台上,信息化各专业以逻辑隔离信道(虚拟专网)建立各自系统。该网络可由核心层、汇聚层和接入层组成,由光传送网提供系统保护,亦称为 IP 数据通信网。设于车站,具有 MSTP 功能的接入网,SDH 节点将提供 2Mbit/s、以太网等接口为信息化各系统的接入和联网提供服务。

2.1.1.4 电话网

铁路电话网的结构分为长途电话网和本地电话网。从 20 世纪 90 年代开始引进程控数字交换机,电话网开始了数字化。本地电话网的管辖范围最初是以电务段的管辖范围来划分的,全路设置了 200 多个本地网,后扩大到了铁路分局范围。随着铁路的改革,分局取消,目前准备进一步扩大本地网范围,在路局范围内设置一个或几个本地网。本地网目前采用 4~5 位的等位制编号方式。当本地网范围扩大后将会升位,采用 5~6 位编号方式。其与公网本地网实现互连互通,作为端局大部分本地网已与当地公网统一编号。呼入时,拨铁路局号;呼出时,将加拨“10”。电话设备全部采用具有组网能力的局用交换机,一般为长、市合一类型,本

地网的汇接电话所具有本地汇接及长途组网功能。分所或支所均采用独立交换机设置于大站。一般中间站不再设置交换机,而是通过接入网将车站用户纳入相关交换机。长途网及本地网内中继线一般采用星型连接,相邻节点间根据话务量设置直达路由。新线铁路电话网的建设应考虑与既有铁路电话网的连接,应从管理归属方面考虑网络的组织、中继的配置、编号的统一。电话网的管理利用交换机的维护终端,本地网优化后将考虑设置完善的网管系统。

为保证铁路应急抢险的紧急呼叫,铁路一直设置人工电话网并保留至今,在中心所设置话务台,话务台的用户线延伸至区间通话柱,当遇到紧急情况时,通过话务员的人工强插完成本地呼叫及通过话务台转接实现长途呼叫。

2.1.1.5 会议电话电视网

采用会议形式进行生产安排和信息交流是铁路系统行业管理的重要手段。我国在解放初期就建立了部局间的会议电话系统。20 世纪 70 年代采用全分配式的会议总机、会议分机,以及会议电话汇接设备,建成了部—局—分局—主要站段的铁路会议电话网。会议电话的传输通路采用数字电路的音频话路,按四线制构成。铁道部、铁路局间设专用主、备用会议电话通路,站段设专用会议电话通路。采用两级管理模式,可分别由部或局组织电话会议。网络覆盖面广,但设备依然是模拟制式。

1996 年,我国在铁道部、铁路局间建立了会议电视系统,以后扩大到了分局,目前形成了部—局—重点站的会议电视网。铁路会议电视网采用 ITU-T H.320 建议,部和局所在地设置了多点控制单元 MCU 设备,采用星型汇接方式组织网络。传输通道为专线,并设置固定的备用通道。会议电视网采用两级管理方式,铁道部和铁路局设会议电视专用的网管设备,能分别满足以铁道部或铁路局为中心召开多种形式电视会议的需要,并能为各级与会者实时地提供双向语音、彩色活动图像和静止图文等业务。为提高画面质量,铁道部与铁路局间采用了 MPEG-2 的图像编解码设备,建设了高清晰度的会议电视系统。

2.1.1.6 支撑网

支撑网包括信令网、同步网和管理网。铁路电话网目前仍采用直连的 1 号和 7 号混合信令方式。

同步网采用主从同步方式,铁道部为基准时钟设置点 PRC,采用 GPS+铯钟设备,设置 1 套。各路局及原分局所在地为区域基准时钟设置点 LPR,采用 GPS+铷钟设备,共设置 57 套,并在网中设置若干套 BITS,向各通信网提供标准时钟源,形成三级同步网络。

各铁路通信网络均建有各自网管系统,一般在部、路局或其他重要地点设置了网管中心。目前,全路正准备筹建通信网络平台的综合网管中心,分别设置在部局所在地,实现故障集中显示和服务质量管理。

2.1.1.7 铁路常用光传送设备

OptiX OSN 2500 STM-16/STM-4/STM-1 智能光传输平台(以下简称 OptiX OSN 2500)是 SDH、Ethernet、ATM、PDH 等技术集为一体的新一代智能光传输平台。实现了在同一平台上高效传送语音和数据业务,支持 E1、T1、E3、DS3、E4、STM-1(电/光)、STM-4、STM-16、AU3 透传,以及 10/100/1000Mbit/s 以太网业务。OptiX OSN 2500 业务管理简单方便,升级和扩容快速且不会中断业务。系统以高速率的总线架构支持产品向智能光网络平滑演进,其特点是:

- (1) 高集成度。线路单元、控制与通信单元、交叉单元

和时钟单元集成在一块单板上，充分为用户节省槽位。

单个 2.6m ETSI 300mm 机柜可以安装子架达 4 个。
表 2.6-1 是机柜可安装 OptiX OSN 2500 子架的数量。

表 2.6-1 ETSI 300 机柜 OptiX OSN 2500 子架数量

类 型	数量 (个)
2600mm(高)×600mm(宽)×300mm(深)	4
2200mm(高)×600mm(宽)×300mm(深)	3
2000mm(高)×600mm(宽)×300mm(深)	3

(2) 丰富的接口。OptiX OSN 2500 有大量接口，见表 2.6-2。

表 2.6-2 OptiX OSN 2500 接口

接口种类	接 口
SDH 接口	STM-1 光接口：I-1、S-1.1、L-1.1、L-1.2、Ve-1.2
	STM-4 光接口：I-4、S-4.1、L-4.1、L-4.2、Ve-4.2
	STM-16 光接口：I-16、S-16.1、L-16.1、L-16.2、L-16.2Je、V-16.2Je、U-16.2Je、彩色光口（定波长输出，与波分设备对接）
	STM-1 电接口
PDH 接口	E1、T1、E3、DS3、E4 业务电接口
以太网接口	10Base-T、100Base-TX、1000Base-SX、1000Base-LX
时钟接口	2048kbit/s、2048kHz
告警接口	8 路输入 4 路输出的开关量告警接口 4 路机柜告警灯输出接口
管理接口	1 路 RS232 远程维护接口 OAM，4 路透明传输串行数据口 Series 1~4，1 路 64kbit/s 的同向数据通道 F1 接口，以太网网管接口，1 路管理串行接口 F&f，1 个公务电话接口，两个出子网语音接口

(3) 交叉能力。OptiX OSN 2500 交叉能力强，见表 2.6-3。

表 2.6-3 OptiX OSN 2500 交叉能力 G

交叉时钟板	高阶交叉能力	低阶交叉能力
CXL1	20	5
CXL4	20	5
CXL16	20	5

(4) 业务接入能力。OptiX OSN 2500 业务接入能力大，如表 2.6-4 所示。

表 2.6-4 OptiX OSN 2500 业务接入能力

接 入 业 务	单子架最大接入数量 (路)
STM-16 标准或级联业务	6
STM-4 标准或级联业务	22
STM-1 (光) 业务	30
STM-1 (电) 业务	22
E4 业务	16
E1/T1 业务	252
E3/DS3 业务	24
快速以太网 (Fast Ethernet) 业务	44
千兆以太网 (Gigabit Ethernet) 业务	14

(5) 组网和保护。OptiX OSN 2500 是 MADM 系统，可提供多达 40 路 ECC 的处理能力，完全满足复杂组网的要求，支持 STM-1/STM-4/STM-16 级别的线形、环形、枢纽

形、环带链、相切环和相交环等复杂网络拓扑。OptiX OSN 2500 还支持四纤/二纤环形复用段保护、线性复用段保护、共享光路虚拟路径保护和子网连接保护等网络级保护，其中复用段的最大支持能力见表 2.6-5。

表 2.6-5 复用段的最大支持能力

保护方式	最大支持能力 (个)
STM-16 四纤环形复用段保护	1
STM-16 二纤环形复用段保护	3
STM-4 四纤环形复用段保护	2
STM-4 二纤环形复用段保护	4

2.1.1.8 铁路常用接入网设备

铁路常用接入网设备是 ZXA10 MSAN 综合业务接入网设备——OLT、ONU 及网管设备。

(1) OLT。综合业务汇聚节点 OLTC 实现各业务接入节点 ONUC 所接入的窄带业务和宽带业务的汇聚，并分别接入到相应的 PSTN/ISDN/DDN/IP/ATM 等业务网络。该设备的特点是：

- 1) 支持 TDM、ATM 和以太网业务的综合业务汇聚与组网保护。
- 2) 提供 4K×4K 窄带业务汇聚能力，包括 POTS、ISDN、DDN 等业务。
- 3) 支持以太网业务的交换和透传，支持虚级联及 LCAS 技术。
- 4) 采用 155M/622M/2.5G 兼容架构，支持 STM-1/4/16 的平滑升级。
- 5) 单模块支持 120×E1 能力，用户集线比任意可调。
- 6) 关键板件采用 1+1 冗余备份。

(2) ONU。综合业务接入节点设备 ONUC 采用 IP+TDM 双总线结构，提供窄带业务与宽带业务的全面综合接入。业务提供能力见表 2.6-6。

表 2.6-6 业务提供能力

业务类型	单板名称	单板端口密度	备 注
POTS 语音接入	ALC	32	
	RALC	32	提供反极性功能
	FLC	16	支持远距离用户接入
ADSL	ADLG	16	内置话音分离器
ADSL+POTS	ILC	16	内置话音分离器
VDSL	VDL	8	内置话音分离器
ISDN 2B+D	DLCA	8	
	DLCC	8	支持 U 接口透传
64K 以下专线(2.4~64K)	DIB	4	提供 V.24 接口
64K 专线	DIB	4	提供 G.703 接口
N×64K 专线	HSB	4	提供 V.35 接口
2M 专线	HDB	4	
2/4 线音频专线	AUDB	8	
2/4 线 E&M 接口	HLC	8	
直接接入用户接口板	TRK	16	
LAN FE	ETI	6	接口光电可选
	ESS8E	8	
	ETS8E	8	
LAN GE	ESDGE	1	提供 1 个 GE 和 4 个 FE
IMA	IMAE	8	支持端口捆绑

该设备的特点是：

- 1) 提供 TDM、ATM 和以太网业务的综合业务接入，包括 POTS、ISDN、音频专线、DDN 等窄带业务，以及 ADSL、VDSL、LAN、SHDSL/HDSL 等宽带业务。
 - 2) 采用 155M/622M/2.5G 兼容架构，支持 STM-1/4/16 的平滑升级。
 - 3) 提供 2K×2K TDM 交叉能力及 5G 数据交换能力。
 - 4) 提供标准 V5 接口，支持 ONUC 独立组网。
 - 5) 关键板件采用主备工作方式，提供冗余保护。
- (3) 网管。ZXUMS 综合网元管理系统 ZXUMS E100 能够统一管理交换、接入、传输、动力等设备。该设备的特点是：
- 1) 提供配置管理、故障管理、性能管理、安全管理功能。
 - 2) 提供网络拓扑定制，满足用户的管理习惯或部门职能划分需求。
 - 3) 提供在线软件升级及自身故障诊断和恢复功能。

2.1.2 调度通信

铁路调度通信网分为铁道部调度通信网及铁路局调度通信网。铁道部调度通信网是铁道部指挥、调度全路运输业务的专用电话系统。铁路局调度通信网是铁路局指挥全局运输业务的专用电话系统。调度通信包括列车调度电话、货运调度电话、牵引电力调度电话和列车无线调度电话等通信系统。

铁路局列车调度电话为列车调度员向调度区内有关人员下达命令，以便实现列车运行图和编组计划。在枢纽地区，还将设置枢纽调度电话，用于指挥枢纽地区各站、场的调度。货调电话为局货运调度员指挥现场货运员装卸货物，牵引电调是接触网的电力调度，无线列调则采用无线方式的列车调度。

2.1.2.1 调度电话业务

- (1) 调度员可个别呼叫其所在调度辖区内的固定终端、移动终端并与之通话。
- (2) 固定终端可个别呼叫其所在调度辖区内的调度员、移动终端并与之通话。
- (3) 移动终端可个别呼叫其当前所在调度辖区内的调度员、固定终端、其他移动终端并与之通话。
- (4) 调度员、车站值班员可组呼其所在调度辖区内的某一组呼组内所有用户并与之通话。
- (5) 移动终端可组呼其当前所在调度辖区内的某一组呼组内所有用户并与之通话。

- (6) 调度员可向其所在调度辖区内的某一组内所有用户发布语音广播。
- (7) 移动终端（机车司机、工务巡道人员、道口值班人员）可紧急组呼其当前所在调度辖区内的紧急组呼组内所有用户并与之通话。

2.1.2.2 有线调度

铁道部调度通信网最初由双音频选叫的总机、分机及载波电路组成。20 世纪 90 年代末，全路干线数字化改造基本完成后，开通了以 Hicom 数字调度交换机为主的调度通信网，在铁道部及各铁路局设置交换机按星型组网方式组成了多媒体通信网络。

铁路局有线调度电话最初也是由双音频选叫的 YD 型调度电话和数字编码选叫的 DC-7 型调度电话组成。传输线是对称电缆，线路长时采用分段遥控组网方式。通道数字化改造后，采用共线的 64kbit/s 通道。为防止系统振鸣，一条线连接的分机数不超过 20 个，各调度系统独立设置。20 世纪 90 年代末，开始采用数字调度交换机组织调度通信系统。设备分设于调度所或调度指挥中心的主系统和设于车站的分系统。主系统由数字调度主机、调度台、维护管理系统和录音系统组成，分系统由设于车站的数字调度分机、车站操作台，以及录音电话组成，原有的调度回线、站间电话、区间电话、远端的音频调度分机均可接入分系统的交换机，提供了两种制式的兼容与互通。主系统与分系统采用串接的 2Mbit/s 数字环路连接，增加了系统的可靠性。各调度系统均接入数调网中，并采用虚拟专网方式组织各调度电话系统。目前使用的设备有 CTT2000L/M 专用数字通信系统、FH98Ⅱ铁路数字专用通信系统、ZST-48 铁路数字专用通信系统等。

铁路局调度通信网如图 2.6-2 所示。

2.1.2.3 无线调度

铁路大量使用的专用频道无线列车调度通信属于模拟通信技术，目前已覆盖所有铁路线，采用的频段为 150MHz 及 450MHz。主要采用 450MHz 频段，457.2~458.65MHz（上行）、467.2~468.65MHz（下行），带宽为 1.5MHz，信道间隔为 25kHz，可组织 60 个信道。无线列调主要功能为列车调度员、车站值班员和司机之间的语音通信，近年来，传送调度命令和车次号校核的数据通信也开始在一些干线中使用。无线列调采用 A、B、C 三种制式：

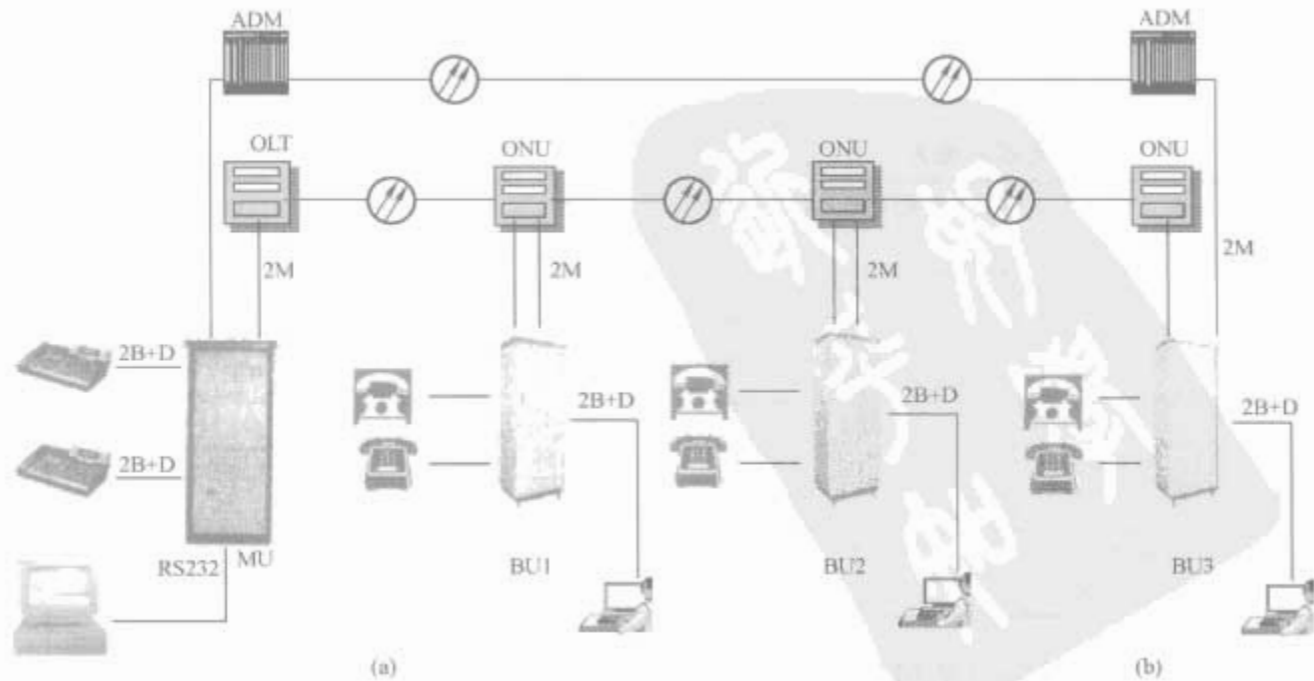


图 2.6-2 铁路局调度通信网
(a) 调度主系统；(b) 车站分系统

(1) A 制式。调度员、车站值班员与司机之间采用双工通信方式；车站值班员、助理值班员、司机之间采用半双工或单工通信方式；移动用户之间采用异频单工通话。

(2) B 制式。通信方式分 B1 和 B2 两种。B1 制式是调度员与司机之间采用双工通信方式，车站值班员、助理值班员、司机间采用双工、半双工、单工方式；移动用户之间采用异频单工通话。B2 制式是调度员、车站值班员与司机之间采用半双工通信方式，车站值班员、助理值班员、司机间采用单工通信方式；移动用户之间采用异频单工通话。

(3) C 制式。调度员、车站值班员、助理值班员、司机间的通话采用单工方式。

B1 制式采用单双工兼容的电台和四频组切换工作方式。B2 制式采用半双工电台独立同步工作方式。这两种方式解决了不同地形的同频干扰，保证了系统的可靠工作。当前 B1 制式成为无线列调的主要制式。

无线列调信道还承担着调度命令及车次号校核两种数据传送功能。调度命令为调度员向辖区内的运行列车发送列车运行指令，在 CTC 区段还能发送行车凭证、调车作业通知单，以及车站值班员向辖区内的运行列车发送行车凭证、调车作业通知单等信息。

车次号校核业务是在机车上设置数据采集编码器，采集机车安全信息综合监测装置的车次号、机车号、位置（公里标）、机车速度、列车总质量、车辆计长、车辆辆数等信息（简称车次号信息），在编组站、沿线车站的规定位置控制机车台实时发送这些信息。车站数据接收解码器将接收这些信息并传送给 DMIS 中心，进行车次号的校核。以上两种数传业务均利用语音业务的工作频率。

图 2.6-3 所示为采用 B1 制式的无线列调系统。

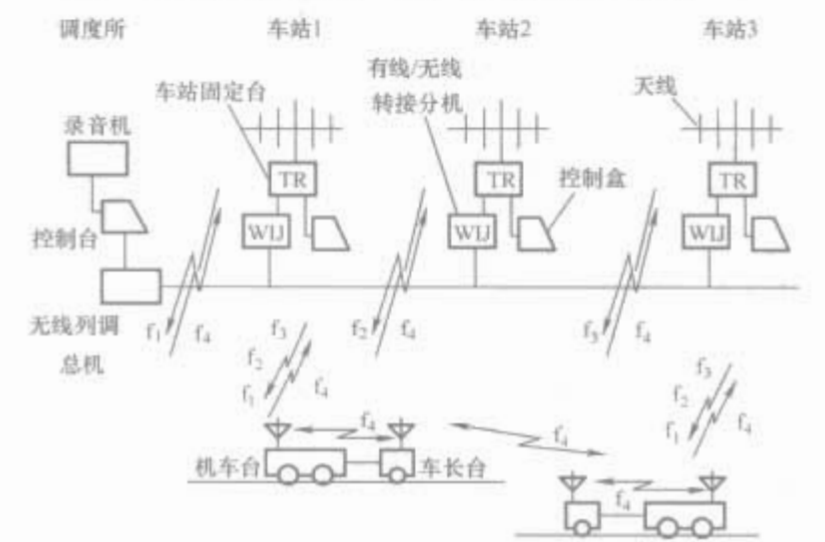


图 2.6-3 采用 B1 制式的无线列调系统

2.1.2.4 常用数字调度设备

(1) 数字调度设备主系统。MU 是铁路数字专用通信系统的主交换控制中心。从总体结构上看，MU 分为前台与后台两大部分。后台放置在局调度机械室，前台放置于各个调度室。其主要功能有：实现数字化调度，实现数字化的专用电话，兼容原有模拟调度总机等。

主系统采用双机双网热备份的结构，各板件均可提供 1+1 或 N+1 热备份的功能。但也可根据用户的要求工作在单机单网状态下。系统结构如图 2.6-4 所示。

后台交换网采用模块化结构设计，由主控层、数字模块层、接口模块层组成，可配接 1 个数字模块层和两个接口模块层、12 块数字板、30 块接口板。各种接口模块的数量根据实际需要灵活配置。主控层与其他模块层之间采用自定义的信号总线相连接。

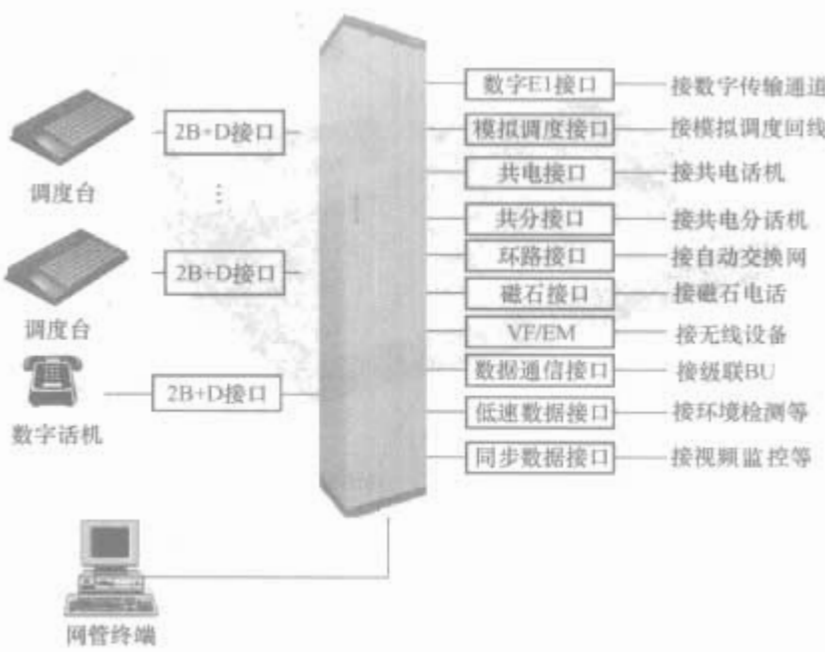


图 2.6-4 主系统结构示意图

(2) 车站分系统。BU 是铁路数字专用通信系统的车站侧设备。从总体结构上，BU 分为两大部分：后台交换网与前台值班台。后台一般安装在车站机械室，前台一般放置于运转室。其主要功能有：数字调度电话、数字化的专用电话、站场通信（集中机功能）、站间通信、区转机、图像监控及数据业务等。分系统结构示意图如图 2.6-5 所示。

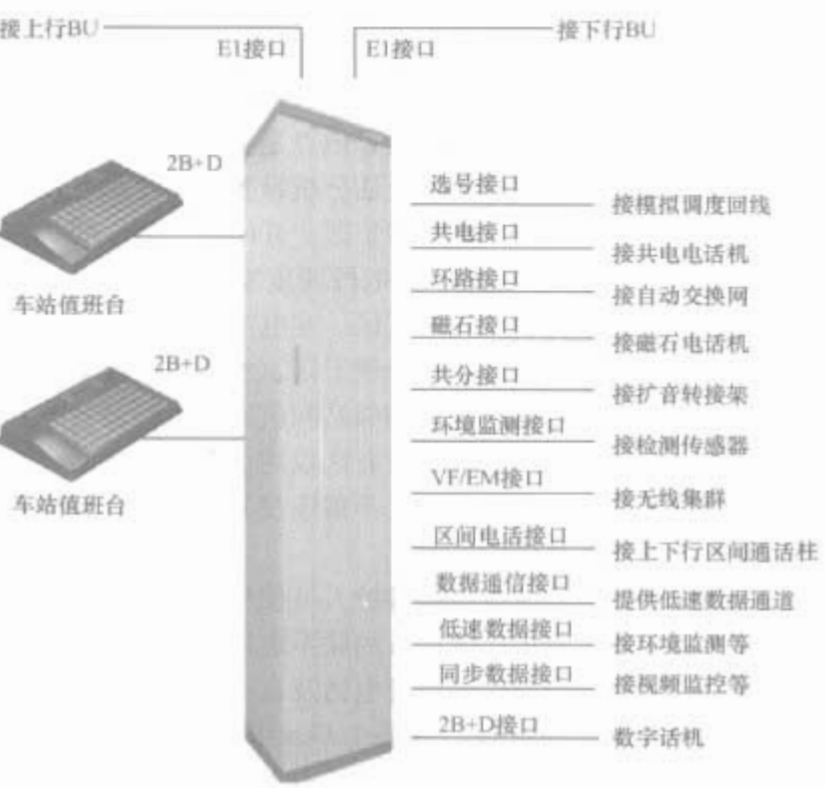


图 2.6-5 分系统结构示意图

分系统的交换网容量、配接值班台数、模拟接口数等见表 2.6-7。

表 2.6-7 分系统的主要参数	
参 数	指 标
系统交换网容量	512×512
系统最多可配接值班台数	15
系统最大可配接模拟接口数	138
系统配接数字 E1 口	4

(3) 操作台。系统操作台分为微机触摸屏式、键控式两种。操作台分为用于枢纽侧的调度台和用于车站侧的值班台。两者在硬件结构上基本相同，通过数据设置完成不同的使用功能。图 2.6-6 是枢纽侧的调度台外形结构。

2.1.3 区段通信

区段通信是铁路沿线基层单位与车站、段等部门进行的



图 2.6-6 枢纽侧的调度台外形结构

通信。区段通信设备的种类有专用电话、站间行车电话、区间电话、道口电话、桥隧守护电话等，其中，专用电话包括车务、工务、电务、供电、水电电话等。

2.1.3.1 区段电话的设置

专用电话是铁路局车务、公务、电务、水电、机务等各段的铁路运输作业电话。各类专用电话分别组成系统，并以车务段、工务段、电务段、供电段、水电段等业务段的管辖区段划分组网。专用电话值班台设置在段调度室，段下属单位设置专用电话分机，如车务专用电话分机设置地点是中间站的車站值班室、中间站其他必要的地点（设1~2台）、车务段调度室；工务专用电话分机设置地点是养路、路基、桥隧领工区及工区、桥隧巡守工值班室、特殊看守地点、工务段调度室；电务专用电话分机设置地点是各信号领工区及工区、电务段调度室；供电专用电话分机设置地点是供电领工区及工区、牵引变电所、接触网工区、开闭所、分区所、自耦变电所、“V亭”控制站、供电段调度室；水电专用电话分机设置地点是电力领工区及工区、变电所值班室、自动闭塞电力领工区及工区、给水所及领工区、水电段调度室。

站间行车电话是铁路区间相邻站间值班员为保证行车安全而设置的联络电话。在铁路所有区段均设置站间电话，应安装通信记录装置，电话回线上不得连接其他电话，并接入车站值班员或信号员的值班台。

区间电话是铁路沿线区间维护人员使用的电话，或在紧急情况下有关部门与车站值班员的联系电话，并能接通该区段内的列车调度、牵引供电调度电话及自动电话。在铁路沿线电缆或光电综合缆区段，每隔1.5km设置一处区间电话的通话柱，通话柱设置与电缆同侧并引入两对电缆芯线。

在铁路沿线，有人看守的区间道口和站内道口设置道口电话，通过电缆回线接入车站值班员的值班台或工务段的有关部门。

当铁路桥梁、隧道和隧道天井由武警守护时，设置桥隧守护电话。桥隧守护电话与直接指挥桥梁、隧道守护武警部队管界一致，在武警部队设置值班台和自动电话，在桥梁、隧道和隧道天井守护点设置1台电话分机，在桥梁、隧道两端间及守护点与营房设置直通电话。当铁路桥梁、隧道由其他人员守护时，其守护电话采用自动电话。

2.1.3.2 区段电话的业务

(1) 专用值班员可个别呼叫其所在系统内的固定终端、移动终端并与之通话。

(2) 固定终端可个别呼叫其所在系统内的专用值班员、其他固定终端、移动终端并与之通话。

(3) 移动终端可个别呼叫其所在系统内的专用值班员、固定终端、其他移动终端并与之通话。

(4) 专用值班员可组呼其所在系统内的某一组内所有固定终端和移动端并与之通话。

(5) 区间电话可个别呼叫本区间、上下行车站值班员及列车调度员等终端。

(6) 车站值班员使用站间行车电话可个别呼叫相邻车站车站值班员，并通话。

2.1.3.3 区段电话系统构成

区段通信最初由双音频选叫的总机、分机及传输电路组成。铁路各段有线专用电话最初也是由双音频选叫的YD型调度电话和数字编码选叫的DC-7型调度电话组成。传输线是对称电缆，线路长时采用分段遥控组网方式。工务电话、车务电话、电务电话、水电电话各专用系统分别以单独回线组成各自的通话系统，并按各段管辖范围分界，每一回线上的选号分机数量不宜超过15台。在数字化改造后，可采用共线的64kbit/s通道取代电缆实回线。

20世纪90年代末，随着数字调度系统的使用，区段通信组网方式发生了变化，其中站间行车电话纳入数字调度系统，并在长途电缆或光电综合缆区段设置1对站间行车电话电缆回线，作为备用通道，接入调度分系统设备；道口电话和桥梁、隧道守护电话可纳入数字列调调度系统，也可采用自动电话方式构成；而专用电话组网方式可采用专线和自动电话两种方式。

专线组网方式。专线组网方式是采用数字调度交换机或纳入列调的数字调度交换机组织区段通信系统，通道为共线型网络结构，在段或局的所在地通信站设置调度主系统，其他站设置车站的分系统，组网方式类似铁路列调系统。段调度室设置值班台，与主系统采用2B+D接口连接，段下属单位设置分机通过电缆实回线与分系统连接。

自动电话方式。自动电话方式有采用铁路沿线接入网提供专用自动电话方式解决专用电话通信。

2.1.4 站场通信

站场通信是为铁路车站，包括编组站、区段站、客运站、货运站运输作业指挥而设置的独立通信系统，包括站场有线通信及站场无线系统。

2.1.4.1 站场电话业务

(1) 系统值班员可个别呼叫其所在系统内的固定终端、移动终端并与之通话。

(2) 固定终端可个别呼叫其所在系统内的系统值班员、其他固定终端、移动终端并与之通话。

(3) 移动终端可个别呼叫其所在系统内的系统值班员、固定终端其他移动终端并与之通话。

(4) 系统值班员可组呼其所在系统内的某一组内所有固定终端和移动终端并与之通话。

2.1.4.2 站场有线通信

站场有线通信主要采用模拟的电话集中机和数字化的调度交换机。20世纪，站场通信普遍使用电话集中机，在车站调度员、车站值班员、调车区长、驼峰值班员、货运值班员、列检值班员等处设置电话，组成以值班员为中心的通信系统。20世纪90年代末，新建站及改造站均采用了数调交换机取代电话集中机组织站场通信网络，实现了站场通信的数字化。

2.1.4.3 站场无线通信

站场无线调度电话主要安装在编组场和专用线较多的货运站，用于车站调度员、车站值班员与调车司机的联系。站场无线通信系统最初采用150MHz或450MHz同异频单工电台，根据作业情况组成多个无线系统，如为行调值班员、

助理值班员、外勤值班员、驼峰值班员、峰尾值班员联络的调度区无线系统；为站调值班员、驼峰值班员、调车司机、调车组成员联络的驼峰无线系统等。20 世纪末，站场无线设备进行了更新换代，一些站场采用了 800MHz 数字集群设备组网，主要是欧洲制式的 TETRA 系统，这样可将现有各移动用户全部纳入集群系统中。铁道部确定采用 GSM-R 为无线技术政策后，今后站场无线也要纳入 GSM-R 覆盖范围。近来，站场信息化要求车一地通信能提供实时宽带的通信，仅靠 GSM-R 难以满足要求。如成都北编组场采用了 GSM-R+WLAN 的新型无线系统，GSM-R 提供一般调度业务，而 WLAN 则为车场调度台和调机车载台提供宽带多媒体业务。图 2.6-7 所示为编组站 WLAN 网络 AP（接入点）的设置与场强覆盖的应用。

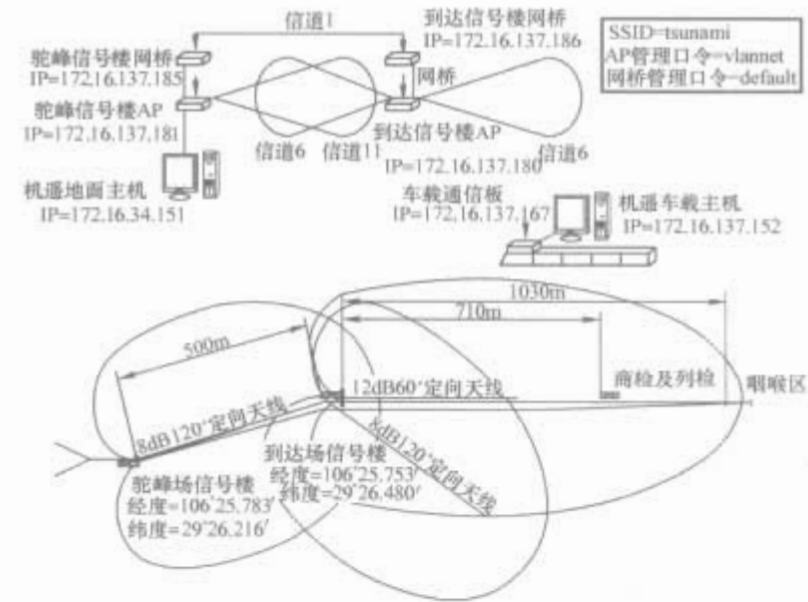


图 2.6-7 编组站 WLAN 网络 AP（接入点）的设置与场强覆盖的应用

2.1.5 应急通信

应急通信是救援指挥体系建设的重要基础，由救援指挥中心和应急通信网络两部分组成。救援指挥中心由铁道部救援指挥中心、铁路局救援指挥中心和现场救援指挥部三级结构组成。

2.1.5.1 应急设施的配置

应急通信设备为应急现场的机务、车辆、电务、水电、工务、公安、医疗等部门的相关人员提供所需的应急通信服务，实现各部门的统一调度、联动指挥。现场救援指挥的设备按具体应实现的功能分 3 个不同的类别设置于铁路沿线（表 2.6-8）。

表 2.6-8 现场救援指挥设备的设置

类别划分	主要功能要求	设备配置原则
A 类	实现图像（动图、静图）、数据、多路语音、过程记录、内部通信、视频会议、决策支持等功能（宜用应急通信车）	1~3 套/路局
B 类	实现图像（动图、静图）、数据、多路语音、内部通信等功能	1~2 套/400km
C 类	实现静图、多路语音功能	1~4 套/200km

2.1.5.2 应急通信网

应急通信网络应充分利用部一局一车站的传送网络，应急通信要尽快解决现场救援指挥部到车站或区间通信接入，指挥部要配置应急通信车，通信车要实现与应急通信网的连接。现场至区间接入点/车站间的信息传送，针对现场的不

同地理环境和通信线路条件，采用不同的解决方案，如有线的 HDSL、野战光缆，无线的 400M 数传电台、2.4G 无线宽带系统及 IPsat 宽带卫星等。采用哪种接入方式，取决于线路的不同等级要求、传输条件限制及经济合理等因素。

2.1.5.3 应急通信车

应急通信车可以看成是一个小型的移动指挥部，配置齐全的有线、无线通信设备，为救援指挥中心提供基本通信功能，适合于在大型活动及发生重大事故抢险活动的情况下，或者是事故现场距公路较远、指挥人员无法靠近现场指挥的情况下使用。一般以路局或客运公司为单位进行配置。

2.1.5.4 通信接入方式

(1) 光缆接入方式。这种应急接入方式主要应用于高速铁路、客运专线和建设 GSM-R 系统的线路，与每隔 3~6km 设置的 GSM-R 基站共用一个传输平台，提供 2Mbit/s 带宽。图 2.6-8 所示为光纤接入方式。

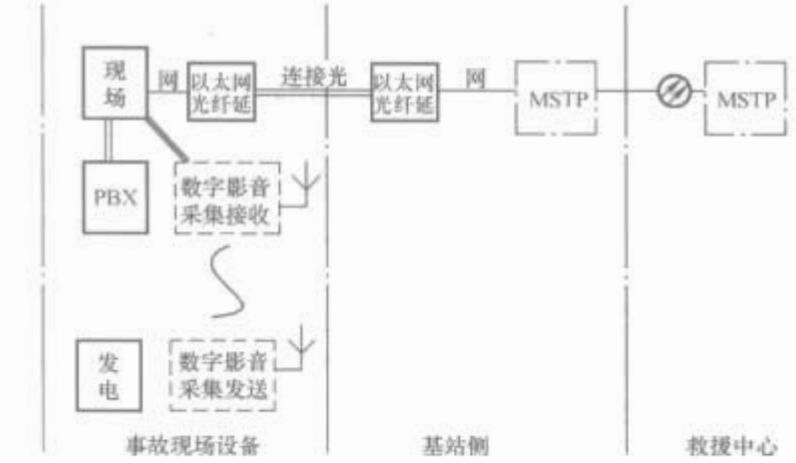


图 2.6-8 光纤接入方式

(2) 通话柱 HDSL 方式。在通话柱线路质量较好的区间，可以考虑采用 HDSL 方式。铁路每隔 1.5 km 有一个区间通话柱，当出现紧急情况时，现场抢险人员由邻近的通话柱引连接线至事故现场，将现场的 HDSL 设备与设在邻近车站的 HDSL 设备通过此对线连接起来，实现无中继地传输 E1 业务。从用户使用的角度来看，HDSL 技术所提供的 E1 服务对用户是透明的。图 2.6-9 所示为通话柱 HDSL 接入方式示意图。

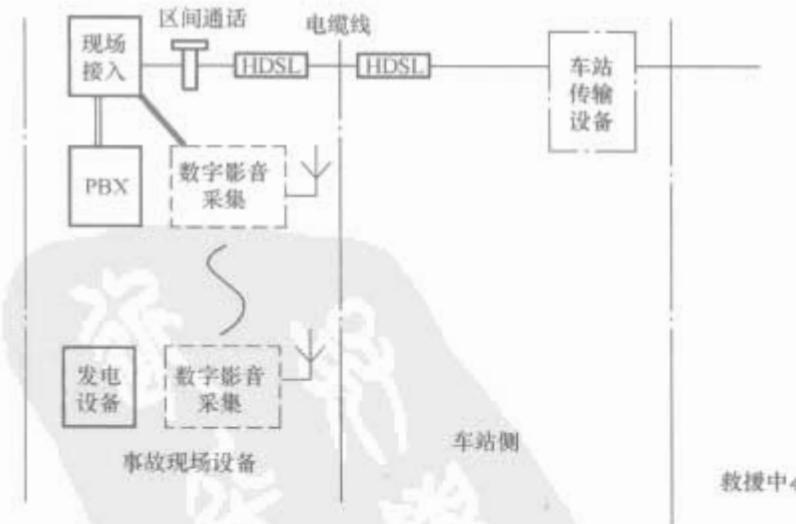


图 2.6-9 通话柱 HDSL 接入方式

(3) 无线接入方式。在通话柱受到损坏且地形较为平坦的区间，可以考虑采用以下无线接入方式，将指挥现场和车站或区间通信接入点建立连接。

1) 2.4G 无线宽带接入系统。采用先进的无线对等网络 (ad hoc) 技术和 QDMATM 技术，基于 IP 协议，实现移动语音、图像、数据高速传输和非 GPS 地理定位等功能。提供 2Mbit/s 数据传输率，突发数据传输率可高达 6Mbit/s。

无线宽带接入系统由救援中心设备 Misc 和现场设备两部分组成。现场设备包括智能接入节点 (IAP)、协议转换器、应急通信包、带无线网卡 (PC 卡) 的移动手持终端 PDA 和笔记本电脑、图像终端等。

2) 400M 数传电台。400M 无线电台数据传输率为 2Mbit/s, 工作于 330~512MHz 频段。电台采用点对点传输方式, 支持全双工通信。

3) IPSat 宽带卫星。IPSat 移动站为双向卫星通信系统, 由 IPSat 终端分系统、视、音频应用分系统和便携式卫星天线三部分组成。抢险时, 视、音频应用分系统通过便携式卫星天线将事故现场数据流发送上卫星, 并传送到设在路局救援中心的 IPSat 终端, 完成通信的接入。

2.1.6 视频监控系统

视频监控是将与行车有关的区间重要设施, 如长大桥梁、隧道、重要路段、无人值守机房、编组场、货场纳入车站、场、段及管理中心视频监控范围。将现场图像传送到中心, 并通过对监视图像的智能分析处理, 自动发现人、动物侵入轨道报警区, 自动向监视人员发出报警提示。由此公安人员可以通过视频监视系统自动报警功能及时发现入侵情况和视频分析手段; 工务人员也可以实时掌握恶劣天气情况下线路的异常、受损情况; 平时视频监控可作为工务巡视的补充手段。在监视覆盖区内出现区间应急抢险情况时, 线路监视设备可以在第一时间实时观察现场情况。因此, 视频监控系统是保证行车安全的重要手段, 在铁路干线、客运专线、高速铁路将得到广泛应用。

2.1.6.1 系统组成

线路视频监控系统主要由监视点的视频采集设备、视频传输设备、视频分析及存储设备及控制显示设备等组成。监视点设备包括摄像机、镜头、云台、云台解码器、护罩、雨刷、加热单元及视频编码设备。

线路视频监控系统一般将多个视频监视点的视频图像信号汇聚到邻近车站, 根据需要确定上传方式和路数。视频传输设备可根据图像格式带宽需求及传输资源等多种因素进行选择。

当编码设备与摄像机距离较近 (不大于 500m) 时, 可用视频同轴电缆连接; 当摄像机距编码器较远且有光纤资源时, 可选择点对点视频传输, 一般有 1、2、4、8、16 路等多种光端机可选, 图像信号为模拟信号或非压缩数字信号; 当需要多个监视点进行级联向同一点汇聚时, 可采用以太网交换机或 CWDM 波分视频光端机。当采用以太网交换机时, 级联个数不宜过多, 通常不多于 5 级。

CWDM 波分视频光端机可在一根光纤上传输视频信号和控制信号, 一般采用 8 波, 视频信号采用非压缩数字编码。视频图像传送到有铁路传输网络的节点, 可采用 MSTP、数据网、RPR 或 SDH 内嵌 RPR 等多种传输制式。

视频分析存储可根据不同机房条件、维护人员配置情况、气候条件等因素确定采用前端分散分析存储、相对集中存储及集中存储等多种方式。对于普通图像信号, 要求存储周期为 7 天; 对于报警信号, 存储周期一般选择 30 天。图像存储格式为 MPEG4, 分辨率可根据是否在大屏上显示选择 CIF 或 4CIF。

存储设备主要包括视频存储服务器、磁盘阵列等。磁盘阵列可根据存储容量不同选择光纤硬盘或 iSCSI 硬盘。若同时有多台服务器和多个磁盘阵列, 可配置 SAN 交换机。

图像显示设备主要包括大屏显示及控制设备、矩阵切换器、多屏处理器等。

2.1.6.2 系统功能

(1) 系统是一个共享的视频监视平台, 可以为公安、客运、工务等业务部门提供视频图像, 具有可多用户同时观看的功能。

(2) 系统支持分级分权限管理, 可灵活设置远程控制终端优先权。调度中心可远程遥控操作 (PTZ) 全线所有的监视点摄像机, 调用回放实时记录的视频图像。

(3) 系统应具有视频图像的汇聚、分发、存储、分析功能, 各级监视终端操作管理本区段的摄像机, 调用视频图像、处理告警事件。

(4) 系统能够调用实时图像, 并进行图像的放大、缩小、录像等操作, 可以为每路图像配置文字注释和编号设置, 叠加时间信息。系统具有 24h 自动回放和 7 天内连续信息存储功能。

(5) 系统具有告警和视频联动功能。当出现异常情况告警时, 系统能自动上传告警视频图像, 并进行录像、存储。

(6) 系统支持告警的视频回放和场景重组功能。

(7) 系统支持人工监视、自动监视模式。在自动监视模式下, 系统可以对监视区域进行图像处理和行为分析, 主动报警; 人工模式下能够对观测范围的图像进行调整和根据需要放大、处理; 从人工模式切换到自动模式时, 不需重置监视区域。

(8) 视频采集点在人工模式下, 可满足白天有效监视距离 1km, 最远监视点 3km; 夜间有效监视距离 800m, 最远监视点 1.2km 的要求。

2.1.6.3 铁路监控系统的特点

(1) 摄像机数量大, 成线状分布。

(2) 要求监视的距离远, 一般不小于 1km。

(3) 摄像机在室外工作, 其防护等级应达到 IP66 等级要求。

(4) 摄像设备一般挂位较高, 很难清晰监视人物面部, 只能监视人物的外形特征及衣着等。

(5) 图像信号通常采用 MPEG 4 或 H.264 压缩编码格式。目前, MPEG 4 应用较多, 分辨率通常选择 CIF、4CIF 或 D1。

(6) 传输网络视频信息流量大, 节点多。

2.1.6.4 线路监视点的设置

在建有 GSM-R 的线路, 基站间距平均为 6~8km, 监视点可选择在基站、直放站等处, 可利用基站天线将摄像机设置在几十米的高度, 以便实现对重点区域的监视。摄像机的设置可选方案如下:

(1) 监视点设置 3 台摄像机, 含两台长距离变焦摄像机和 1 台球型摄像机。该方案在 70m 的监视半径范围是靠球机实现的, 不能进行行为识别; 在人工模式下, 最远观测点单侧可达 3km。球形摄像机防护对风沙等抵御能力较差。

(2) 每个线路监视点设置 4 台摄像机, 含两台中距离变焦摄像机、两台短距离摄像机, 满足 35m~1km 范围的有效识别。对于 2km 范围内监视的重点目标, 可加配一台长距离变焦摄像机。

多数隧道口建有直放站, 主要用于监视隧道两端洞口。摄像机可布放在隧道内的侧壁上, 从洞内向外拍摄。重要桥隧等处的监视还可以采用彩色摄像机和热像仪实现全天候监视。

2.2 铁路综合数字移动通信系统 GSM-R

GSM-R (GSM for railway) 系统是一种数字制式的铁路移动通信系统, 在欧洲发展比较快, 我国铁路也已应用。

1993 年,国际铁路联盟(UIC)为满足欧洲各国铁路对移动通信的需求,与欧洲电信标准化组织(ETSI)协商,提出欧洲各国新一代铁路无线通信——以 GSM Phase2+标准为基础的 GSM-R 技术,用于实现列车无线调度通信、平面调车通信,以及维护与管理的移动通信,并通过 GSM-R 传送列车控制信息。GSM-R 网可以有条件地与铁路固定专用电话网络或公众地面通信网络进行互联,实现更广泛的通信。

2.2.1 系统结构

GSM-R 系统包括网络子系统(NSS)、基站子系统(BSS)、运行支撑子系统(OSS)和终端设备等 4 个部分。其中,网络子系统包括移动交换子系统(SSS)、通用分组无线业务系统(GPRS)和移动智能网系统(IN)。GSM-R 系统的结构如图 2.6-10 所示。

2.2.1.1 网络子系统(NSS)

NSS 建立在移动交换中心处,负责端到端的呼叫、用户数据管理、移动性管理和与固定网络的连接。NSS 通过 A 接口与 BSS 连接,与固定网络的接口决定于互联网络的类型。

2.2.1.2 基站子系统(BSS)

BSS 由一个基站控制器(BSC)和若干个基站收发信机(BTS)组成。BTS 主要负责与一定覆盖区域内的移动台 MS 进行通信,并对空中接口进行管理;BSC 用来管理 BTS 与 MSC 之间的信息流。BTS 与 BSC 之间通过 Abis 接口通信。BSS 还可能存在编码速率适配单元 TRAU,实现 GSM-R 编码速率向标准的 PSTN 或 ISDN 速率的转换。TRAU 与 BSC 通过 Ater 接口连接。

2.2.1.3 移动台

移动台是接入 GSM-R 网络的用户设备,包括移动终端 ME 和终端设备 TE,或通过终端适配器与 ME 连接的 TE。移动台除了具有通过无线接口 Um 接入到 GSM-R 系统的一般处理功能外,还为移动用户提供人机接口。

2.2.1.4 操作和维护子系统(OSS)

相对独立的 OSS 为 GSM-R 网络提供管理和维护功能,其具体功能由操作维护中心 OMC 来完成,其中,OMC-R 负责管理 BSS,OMC-S 负责管理 NSS。OSS 主要提供移动用户管理、移动设备管理、网络操作和控制 3 类功能。

2.2.1.5 移动智能网子系统

该系统在移动交换子系统中引入智能网功能实体,将网

络交换功能与业务控制功能相分离,实现对呼叫的智能控制。

GSM-R 智能网由 GSM 业务交换点(gsmSSP)、GPRS 业务交换点(gprsSSP)、智能外设(IP)、业务控制点(SCP)、业务管理点(SMP)、业务管理接入点(SMAP)及业务环境接入点(SCEP)等设备组成。

2.2.1.6 GPRS 子系统

该系统负责为无线用户提供分组数据承载业务,包括核心层和无线接入层。核心层由 SGSN、GGSN、DNS、RA-DIUS、GRIS 等节点及连接这些节点的核心数据网组成。无线接入层由 PCU、基站、终端等组成。GPRS 无线接入层组网应充分利用 GSM-R 系统的设备资源,保护投资;与 GSM-R 系统共用频率资源;利用 GSM-R 系统的基站实现无线覆盖,不单独增加 GPRS 系统基站。

网络中的不同设备可以通过标准接口来实现移动业务的本地和国际互联。GSM-R 网络的信令系统采用 7 号信令网传送呼叫控制信息和其他信令信息。

2.2.2 主要业务

GSM-R 网提供的业务包括话音业务、数据业务、与呼叫相关的业务和铁路特定业务,并可在上述业务的基础上扩展新的应用。

2.2.2.1 语音业务

语音业务包括:

- (1) 点对点语音呼叫业务。
- (2) 语音广播业务。
- (3) 语音组呼业务。
- (4) 公共紧急呼叫业务。
- (5) 多方通信。

2.2.2.2 数据业务

数据业务包括:

- (1) 电路域数据业务。
- (2) 分组域数据业务。

2.2.2.3 与呼叫相关的业务

与呼叫相关的业务包括:

- (1) 闭合用户组。
- (2) 增强型多优先级与强拆。
- (3) 高级呼叫处理,包括呼叫前转、呼叫转移、呼叫等待、呼叫保持等。

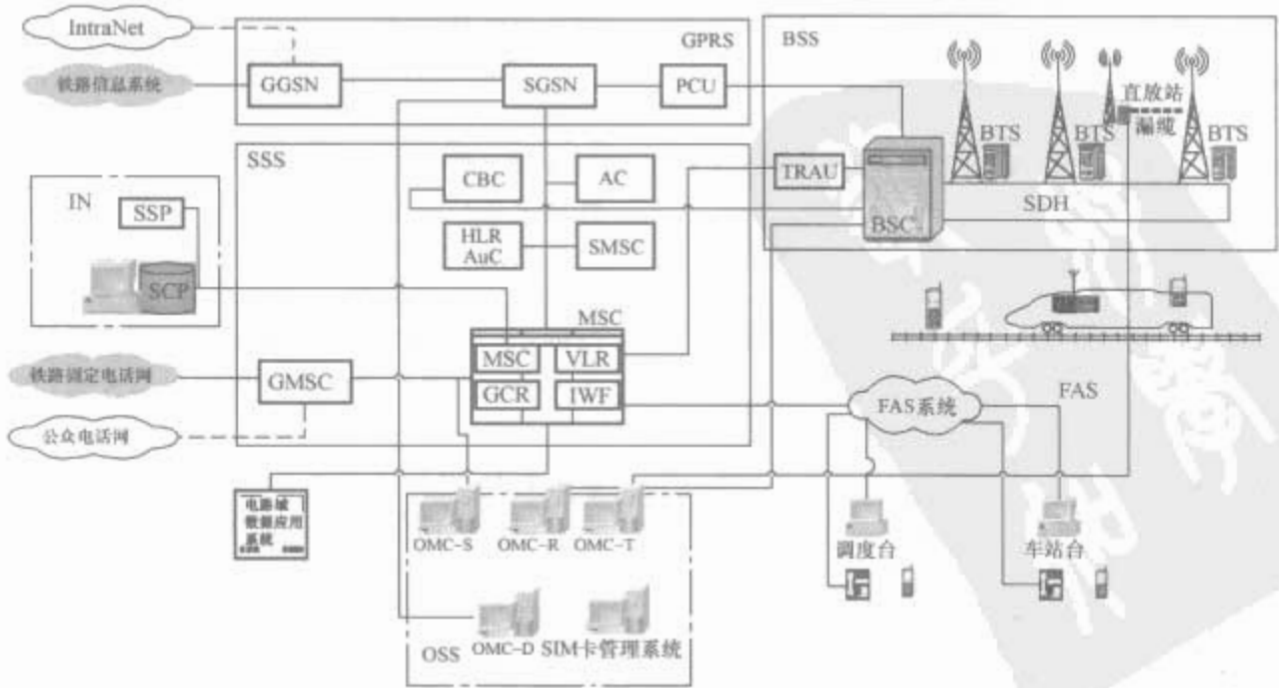


图 2.6-10 GSM-R 系统的结构

(4) 号码识别, 包括主叫号码识别显示、主叫号码识别限制、被叫号码识别显示、被叫号码识别限制。

- (5) 自动应答。
- (6) 呼叫监视指示。

2.2.2.4 铁路特定业务

铁路特定业务包括:

(1) 功能寻址。用户通过功能号码发起或接收呼叫, 网络基于功能号进行寻址。

(2) 基于位置寻址。网络根据用户所拨打的短号和用户自身位置信息, 将呼叫路由到一个与该用户当前所处位置相关的目的地址。

(3) 精确位置寻址。精确位置寻址是基于位置寻址业务的扩充, 网络根据用户所拨打的短号和用户自身的精确位置信息, 将呼叫路由到一个与该用户当前所处位置相关的目的地址。

2.2.3 系统功能

(1) 为支持基本业务, GSM-R 网络提供以下功能:

- 1) 呼叫处理。
- 2) 用户身份鉴权。
- 3) 紧急呼叫。
- 4) 语音组呼和语音广播。
- 5) 短消息业务。
- 6) 信令信息的加密。

除此之外, GSM-R 网络还为支持各种补充业务提供了相应的功能。

(2) GSM-R 网络为支持蜂窝系统的操作提供以下功能:

- 1) 位置登记。
- 2) 切换。
- 3) 呼叫重新建立。

GSM-R 网络还具有网络管理功能和一些附加功能, 如呼叫处理的排队、安全功能、不连续发送和接收等。

2.2.4 主要设备

在 GSM 移动交换中心和拜访位置寄存器——M900/M1800 MSC/VLR 的基础上, 根据 GSM Phase 2+ 的 ASCI 和欧洲铁路综合数字增强移动网 EIRENE (European integrated railway radio enhanced network) 的协议规范开发的 GSM-R 网络的移动交换中心 MSC/VLR/GCR。

GSM-R MSC/VLR/GCR 接口信令标准全面支持 ETSI 规范定义的各种业务。系统采用模块化结构, 处理能力强, 平滑扩容, 容量最大可达 100 万用户。MSC/VLR/GCR 在 GSM-R 系统中的位置如图 2.6-11 所示。

2.2.4.1 移动交换机

(1) 硬件结构。GSM-R MSC 采用了模块化思想, 实现



图 2.6-11 MSC/VLR/GCR 在 GSM-R 系统中的位置

MSC—移动交换中心; BSC—基站控制器; BTS—基站收发信台; HLR—归属位置寄存器; FFN—Follow-Me 功能节点; VLR—拜访位置寄存器; SMSC—短消息中心; GCR—组呼寄存器; RBC—无线闭塞中心; AC—确认中心; PBX—小交换机; EMS—列车车载台

了网络交换、对外接口和业务处理部分的分离。GSM-R-MSC 系统硬件结构如图 2.6-12 所示。

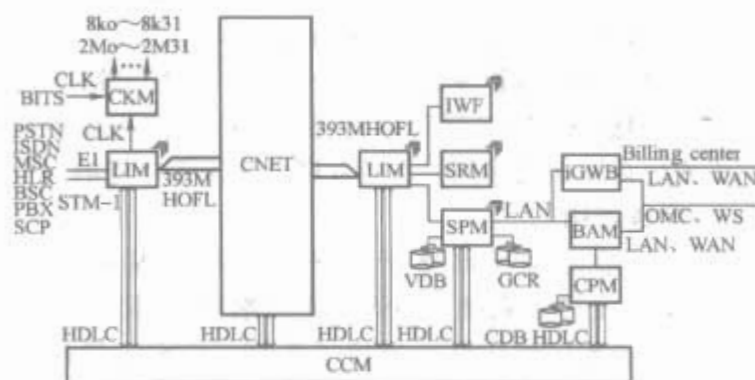


图 2.6-12 GSM-R MSC 系统硬件结构

CKM—同步时钟模块; CCM—通信控制模块; CPM—中央处理模块; CNET—中心交换网; LIM—线路接口模块; SPM—业务处理模块; IWF—网络互通功能模块; SRM—资源共享模块; BAM—后管理模块; VDB—VLR 数据库; GCR—组呼寄存器; CDB—中央数据库; HOFL—高速光纤链路; HDLC—高速数据链路规程; LAN—局域网; WAN—广域网; E1—1 次群速率; STM-1—同步转移模式 1; iGWB—计费网关; WS—工作站; OMC—操作维护中心; CLK—时钟信号

(2) 软件结构。GSM-R MSC 系统软件由两大部分构成: 前台 (主机) 软件和后台 (OMC) 软件, 如图 2.6-13 所示。

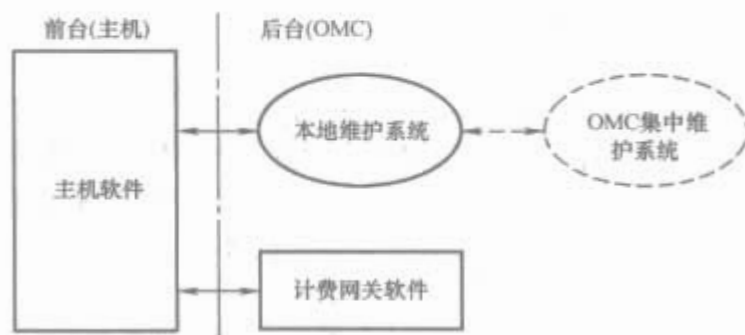


图 2.6-13 GSM-R MSC 系统软件结构图

主机软件主要指运行于主机的 5 种主要单板 (NCC 板、GSPC 板、GVDP 板、GGDP 板、CDP 板、AMP 板) 上的软件, 负责控制移动交换机各种硬件资源, 提供信令处理、呼叫处理功能, 使 GSM-R MSC 实现 ASCI 和 EIRENE 规范定义的所有功能。

OMC 软件包括本地操作维护系统、集中操作维护系统及计费网关软件, 实现对移动交换机的操作维护、局数据管理、性能统计、告警管理及计费管理等功能, 其中, 计费网关软件运行于 iGWB (计费网关)。本地操作维护系统包括运行于 BAM 上的后管理模块软件、运行于 WS 上的操作维护终端软件及运行于 BAM 和 (或) WS 上的通信网关。OMC 集中操作维护系统包括运行于 OMC Server 上的 OMC 服务器软件及运行于 WS 的 OMC SHELL 软件。

2.2.4.2 基站控制器 (BSC)

(1) 硬件结构。BSC 可分为管理和通信模块 (AM/CM)、基本模块 (BM)、码变换单元 (TCSM)、中心数据库模块 (CDB)、后管理模块 (BAM)。BSC 硬件结构如图 2.6-14 所示。

1) AM/CM 为各 BM 的模块间通信提供通道, 是 BSC 的话路交换和信息交换的中心。

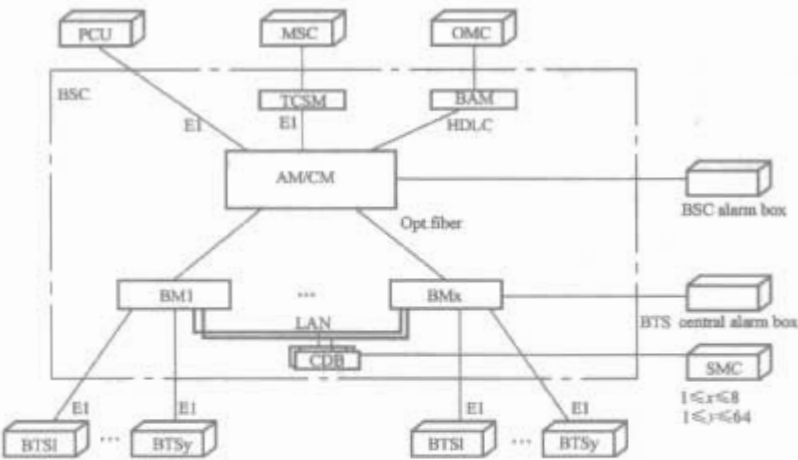


图 2.6-14 BSC 硬件结构

- 2) BM 完成呼叫处理、信令处理、无线资源管理、无线链路管理和电路维护等功能。
- 3) TCSM 完成码变换/速率适配和子复用功能。
- 4) CDB 是业务处理中心，支持广播短消息业务。
- 5) BAM 是 BSC 和 OMC 之间通信的桥梁，OMC 通过 BAM 模块对 BSC 操作维护。

(2) 软件结构。BSC 软件由三大部分构成：主机软件、单板软件和 OMC 软件。BSC 软件分布如图 2.6-15 所示。

- 1) 主机软件。主机软件是指运行于 BM 的 GMPU 上的软件，负责控制 BSC 各种硬件资源，提供信令处理、无线资源管理、接口管理等功能。
- 2) 单板软件。单板软件是指各种智能化单板，如 FTC、BIE、MSM、LPN7、GLAP 等上运行的软件，完成各种接口功能及数据链路层和网络层的协议处理。主机软件与单板软件通过邮箱方式及以内存映像技术为主的进程间通信 (IPC) 协议进行通信，交换信息。

主机软件与单板软件既分工又协作，保证了系统的高可靠性和高处理能力。

- 3) OMC 软件。实现对 BSC 的维护、数据配置、话务统计、告警管理等功能。

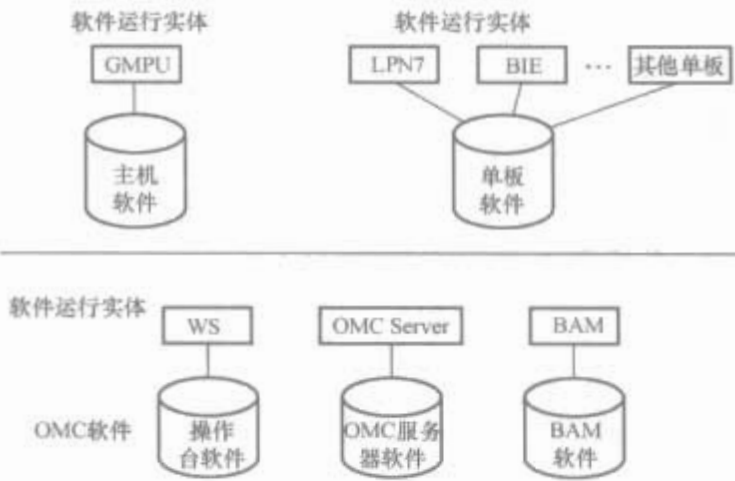


图 2.6-15 BSC 软件分布

2.2.4.3 宏蜂窝基站 (BTS 312)

BTS 312 采用模块化结构，即处理一个载频的所有电路（包括基带处理、RF 部分、功放和电源等）集成在一个插入式模块 TRX 内，从而简化了系统配置，便于安装维护和扩容，也便于引入新的硬件技术。

BTS 312 可分为公共单元、载频单元和天馈单元 3 部分，其系统体系原理结构框图如图 2.6-16 所示。BTS 312 主要由定时传输管理单元 (TMU)、收发信机 (TRX)、合分路单元 (CDU)、传输扩展单元 (TEU)、供电单元

(PSU)、电源监控单元 (PMU) 等组成。宏蜂窝基站 (BTS 312) 原理结构如图 2.6-16 所示。

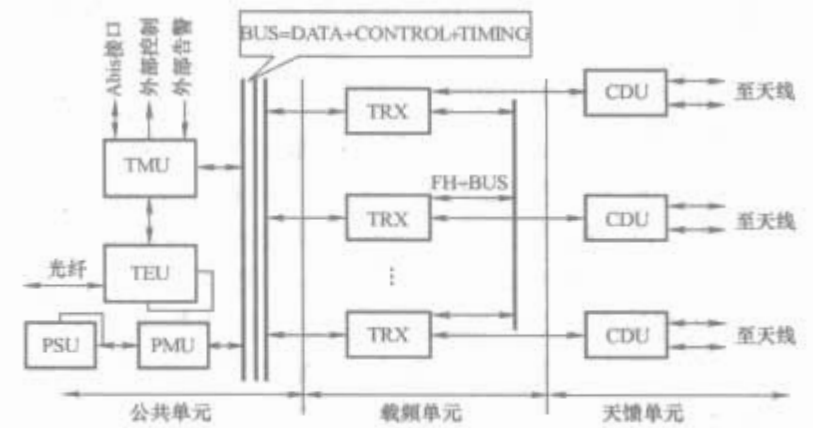


图 2.6-16 宏蜂窝基站 (BTS 312) 原理结构框图

2.3 城市轨道交通通信系统

城市轨道交通通信系统是运营指挥、企业管理、服务乘客的网络平台，是轨道交通正常运转的神经系统。通信系统由传输、无线、公务电话、专用电话（包括调度电话、站内电话、站间行车电话和区间电话）、闭路电视监视、广播、时钟等子系统组成。

2.3.1 数字传输系统

数字传输系统是城市轨道交通工程通信系统的主要子系统，为通信系统中的各子系统、列车监控信息 (ATS)、综合监控系统 (ISCS)、自动售检票系统 (AFC)、旅客服务信息 (PIS)、办公自动化系统 (OA) 等专业提供可靠的、冗余的、可重构的、灵活的传输通道，是保证城市轨道交通运行所必需的信息传输媒体。

数字传输系统采用光纤数字通信设备。光系统按 1:1 (或 1+1) 设置，具备主、备用通道保护，业务节点设备分别与设置在隧道内两条光缆中的光纤相连，构成自愈环，确保了传输系统可靠性。

通信网的各节点可提供点对点直通式、一点对多点共用式及总线式等信道形式；可提供话音、高质量宽带音频接口、E1、STM-1 (155M) 等数字接口，RS232、RS422、RS485、以太网 (10/100M、GE) 等数据接口，以供话音、数据、图像传输之用。

数字传输系统具有自诊断功能，并具有集中告警维护、统一管理的网络管理功能，可进行故障管理、性能监视、系统管理、配置管理。系统具有扩展性和灵活性，易于平滑升级。数字传输能够提供与其他线路信息的互联互通。

2.3.1.1 传输技术

根据传输网络技术的发展情况，目前轨道交通传输网构建技术主要有以下几种：

- (1) OTN (开放式传输网络)。OTN (open transport network) 使用光纤传输及时分复用技术，系统带宽为 36、150、600Mbit/s 及 2.5Gbit/s。

OTN 采用一次复用机制，在占用较少比特数的情况下，综合不同的网络传输协议，集成多种用户接口，一体化地实现低速和高速信息的接入和传输。可以直接提供工业界标准的通信协议接口，如话音接口、E1、RS-232/422/423/485 接口、高质量音频接口、10/100M Ethernet、4/16M Token Ring 接口、视频接口等，而不需要借助接入设备。

- (2) ATM (异步传输模式)。ATM (asynchronous transfer mode) 属分组交换技术 (包交换)。信元长度固定，

采用异步时分复用方式，动态分配带宽，具有统计复用功能。支持多业务、多媒体应用，提供端到端的接入解决方案；能够进行各类电路仿真，承载语音、数据和图像业务，实现宽带接入及交换。

在轨道交通通信网中有采用 SDH 技术传输实时业务，以及 ATM 传输非实时业务（包括图像业务）的应用。

(3) RPR（弹性分组环）。RPR（resilient packet ring 弹性分组环）是一种新型的 IP 环网传输技术，与物理层相对独立。纯 RPR 是基于以太网或路由器实现的。

RPR 有如下特点：光纤环可以分段传输数据，实现空间复用；双环结构的两根光纤同时传输数据，使带宽成倍提高。所有节点对带宽具有同等的控制权；通过统计复用，任意节点间富余的带宽可以被其他节点所使用，以提高可用带宽；可以直接映射和支持 IP 包的优先级，直接支持 IP 包的广播及其他业务控制功能。

(4) SDH 光同步数字传输设备。SDH 是通用的传输技术体制，符合 ITU（国际电信联盟）的相关建议标准。SDH 网具有信息负荷的透明性，能传送各种信息结构的净负荷及其混合体，常与几种接入设备结合使用。

1) 基于 SDH 的 MSTP（多业务传送平台）。MSTP 就是对所支持的以太网、ATM 等多种业务经过处理后按一定的格式（或协议）封装在一个或多个 SDH VC 中进行传输。MSTP 采用了 SDH 组网和保护技术，保留了固有的 TDM 交叉能力和传统的 SDH/PDH 业务接口，同时又提供 ATM、IP 业务接口，实现实时、非实时的数据业务的传输。

2) MSTP（内嵌 RPR）。基于 SDH 平台，既能保证目前大量的 TDM 业务对传输性能的要求，同时融合了 RPR 技术对以太网数据业务高效、动态的处理功能，将不同业务的承载方式集于一体。

MSTP（内嵌 RPR）传送语音的 VC 通道仍保持所有的 SDH 特性，其保护倒换遵从标准的 SDH 环网保护方式。传送数据业务的 VC 通道支持 RPR 技术，并进行业务分类、公平控制、拥塞处理，以保证数据业务传输的 QoS。

(5) 接入技术。接入设备是将音频、低速数据、高速数据及图像业务通过接口转换和适配接入传输网络的设备。目前，在电信和轨道交通的通信网中，常采用的是接入网（OLT+ONU）设备或 PCM 设备。

在城市轨道交通的各种业务中，2Mbit/s 及以上业务均能直接通过传输网络完成接入，对于 2Mbit/s 以下的低速率业务，主要由 PCM 窄带接入设备完成（OTN 网络除外）。PCM 窄带接入设备具有低速交叉连接功能，用于完成 2Mbit/s 以下的音频、共线或点对点低速数据业务。

2.3.1.2 传输系统组成

根据目前传输网络技术的发展情况及地铁传输系统的功能要求，城市轨道交通传输系统可采用以下几种传输系统组成方式：

(1) OTN 系统组成方式采用单环结构，保护方式可采用通道保护自愈环。在业务节点设置 OTN 传输设备节点机，利用轨道线路上下行两侧的光缆中的 2 芯光纤将相邻站的 OTN 传输设备进行连接，构成自愈环；在 OTN 环网的传输通道上，根据实际应用需要，设定传送 TDM 话音业务的通道和传送 IP 等数据业务的通道带宽。在业务接口多的站点，需配置多个 OTN 节点机叠加实现。

(2) MSTP（内嵌 RPR）+接入设备系统组成方式在系统组网网络结构上可采用单环或以控制中心为相切点的双环结构，保护方式采用复用段保护自愈环。在控制中心、车站

及车辆段等业务节点设置 MSTP（内嵌 RPR）+接入设备，通过专用光纤构成环形自愈网；在 MSTP 环网的传输通道上，根据实际应用需要，设定传送 TDM 话音业务的 VC 通道和传送 IP 等数据业务的 RPR 通道（ $nxVC-X$ ）带宽；通过 RPR 承载综合监控、旅客信息服务、闭路电视图像、AFC 等 IP 数据业务。图 2.6-17 所示为 MSTP（内嵌 RPR）+接入设备组网方式及设备组成示意图。

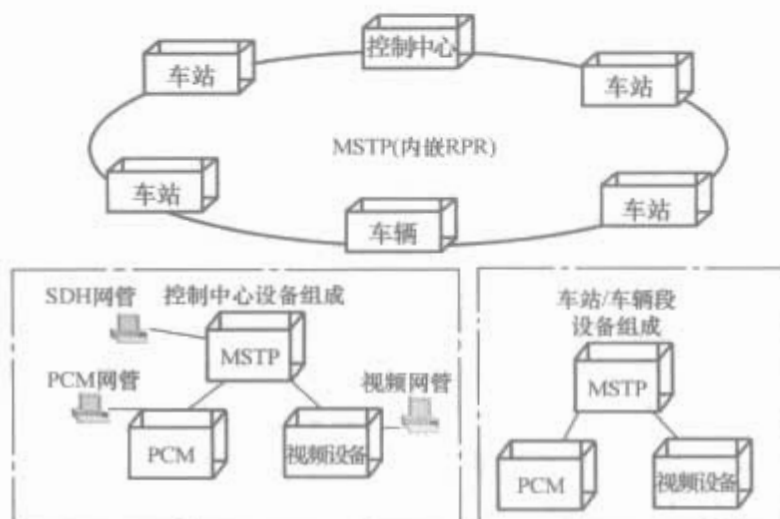


图 2.6-17 MSTP（内嵌 RPR）+接入设备组网方式及设备组成示意图

(3) MSTP+接入设备系统组成方式。在系统组网网络结构可采用单环或以控制中心为相切点的双环结构，保护方式可采用通道保护自愈环或复用段保护自愈环。在业务节点设置 MSTP 传输设备，利用轨道线路上下行两侧的光缆中的 2 芯或 4 芯光纤将相邻站 MSTP 传输设备进行连接，构成自愈环；在 MSTP 环网的传输通道上，根据实际应用需要，在系统带宽中预先分配设定传送 TDM 业务的 VC 通道和传送 IP 等数据业务的通道带宽。需预先分配带宽，组成多个共享以太网环，实现承载地铁/轻轨中的 IP 数据、图像业务；而另一些带宽用于承载地铁/轻轨中的实时业务及低速业务。

(4) MSTP+ATM+接入设备系统组成方式。根据承载业务特点，利用 MSTP 设备和 ATM 设备分别构建轨道交通通信网两个光传输平台，一个平台以 MSTP 设备+接入设备作为节点，通过地铁专用光纤组成环型传输自愈网，此平台可承载所有 TDM 业务，并为 ATS、AFC、综合监控、旅客信息服务等业务提供以太网通道；采用 MSTP 传输系统设备承载地铁/轻轨中 2Mbit/s 以上速率的实时业务，通过接入设备与 MSTP 传输设备连接提供 2Mbit/s 以下速率的窄带业务接入。另一个平台以 ATM 设备作为节点，通过地铁专用光纤组成环型或网状传送网。该平台承载实时闭路电视监控图像业务，网络由 ATM 设备和通信系统提供的光纤组成。

MSTP 系统组网网络结构可采用单环或以控制中心为相切点的双环结构，保护方式可采用通道保护自愈环或复用段保护自愈环。ATM 系统组网网络结构可采用网状网或多个环网结构。

(5) MSTP+IP 路由器+接入设备系统组成方式。利用 MSTP 设备和 IP 路由器设备分别构建轨道交通通信网两个光传输平台，一个平台由 MSTP 设备+接入设备作为节点，通过地铁专用光纤组成环型传输自愈网，此平台可承载所有 TDM 业务，并为综合监控提供备用通道，为 ATS、AFC 等业务提供以太网通道；采用 MSTP 传输系统设备承载地铁/轻轨中 2Mbit/s 以上速率的实时业务，通过接入设备与

MSTP 传输设备连接提供 2Mbit/s 以下速率的窄带业务接入。另一个平台以 IP 路由器设备作为节点,通过专用光纤组成多个 IP 数据环网或网状网,该平台可承载实时和非实时数据业务,为综合监控、旅客信息服务、闭路电视图像业务提供承载平台。系统组成图同 MSTP+ATM+接入设备方式。

2.3.1.3 主要传输设备

(1) OTN 设备。OTN 传输设备有 OTN150、OTN600、OTN2500、OTN-X3M,数据传输率为 150Mbit/s、600Mbit/s、2500Mbit/s、10Gbit/s。OTN 网络结构由光纤、OTN 节点机、OTN 公用逻辑模块、OTN 接口模块、网管共 5 个系统部件组成。其节点机类型分为 N215、N22、N42、N415。在 OTN 环中使用相同的线路带宽(150 Mbit/s 或 600 Mbit/s 或 2500Mbit/s)时,N215 与 N22 可用于相同的网络。N42、N415 节点机专为 10Gbit/s 带宽需求上下业务的网络 OTN-X3M 设置,且不能与 N215、N22 节点机共同组环。

OTN 节点机能提供模拟电话、数字电话、音频 2/4 线、高质量语音(15 kHz)的语音接口模块;能提供 V.24/RS232(点对点、多通道、多支路)、V.11/RS422(点对点、多支路)、RS485(Profibus, Modbus+)数据接口模块,IEEE 802.3(10/100 Mbit/s 以太网接口)、Token Ring IEEE 802.5 局域网接口模块,PAL、NTSC(M-JPEG / H.264 数字压缩)视频接口模块。

OTN 网络互联接口有 2Mbit/s、34/45Mbit/s OTN/SDH/SONET 电接口模块,STR150 SDH(STM-1)光接口模块,OTN 在语音、视频、数据和 LAN 上支持各种工业标准(如 G703、G823、MJPEG、H.264、IEEE802.3 等)。

(2) MSTP 设备。随着 Internet 的迅速发展,目前所有 SDH 设备均具备 IP 数据业务,均为 MSTP 传输设备。

SDH 设备种类分为分插复用设备(ADM)、终端复用设备(TM)、再生中继器设备(REG);SDH 设备系列有 STM-64 设备、STM-16 设备、STM-4 设备、STM-1 设备。SDH 设备交叉连接矩阵有高阶交叉连接和低阶交叉连接,STM-4 设备和 STM-1 设备具备 2Mbit/s/s 速率的低阶交叉连接矩阵,STM-64 设备和 STM-16 设备一般分为高阶交叉连接矩阵和低阶交叉连接矩阵。交叉连接矩阵实现群路到支路、支路到群路、群路到群路,支路到支路的交叉。各工程可根据系统带宽和上下业务容量带宽选择无阻塞交叉连接矩阵。连接类型有单向、双向、广播式;支路侧接口应能任意配置,对其他支路的业务不产生任何影响。

MSTP 是一新型 SDH,其核心处理基于 SDH 的 VC 通道,并增加了以太网处理功能,可提供以太网业务的 2 层交换和汇聚功能。

1) STM-N 终端复用设备(TM)。提供单纯的 G.7032、34、140Mbit/s 到 STM-1 复用功能;能将输入信号灵活地安排到 STM-N 帧中的任何位置的功能,在改变和增减支路口时不应对其他支路的业务产生任何影响,可通过 VC-12/3 和 VC-4 通道连接功能块实现;提供将若干 STM-M 信号组合为一个 STM-N (M<N) 信号的能力。

2) 分插复用设备(ADM)。提供 STM-N 信号内插入任何支路信号的能力。接入信号的接口可以是符合 G.703 或 STM-N 规定的接口。应允许 STM-M 信号内的 VC-12/3/4 就地终结或再复用后传输,也允许本地产生的 VC-12/3/4 信号分配给 STM-M 输出的任何空缺位置。

3) MSTP 设备支路侧接口种类 G.703 电接口:2048、34368、139264kbit · s⁻¹/s, STM-1 电接口。G.957 光接

口:STM-1 光接口、STM-4 光接口、* STM-4C 光接口(级联接口)、STM-16 光接口。其他接口:ATM、POS、10/100Mbit/sFE、GE 接口。

4) MSTP 设备群路侧接口种类。STM-1、STM-4、STM-16、STM-64 光接口。光接口的线路码型为加扰码 NRZ 码,应符合 ITU-T 建议 G.707,各级光接口的参数规范应不低于 ITU-TG.957 的要求;对于长距离传输采用光放大器应不低于 ITU-TG.691 的要求。

2.3.2 公务电话系统

公务电话系统用于轨道交通内部的一般公务通信和轨道交通内部用户与公用电话网用户的电话联络,通话范围包括地铁内部、市话及国内、国际长途。

当专用电话系统出现重大故障时,公务电话系统可以作为专用通信的应急通信手段。系统采用数字程控电话设备,由数字程控交换机和传输通道组成公务电话网,并与市话网相通。

公务电话网内程控交换机之间、程控交换机和无线集群交换机之间采用 2Mbit/s 数传输率的数字中继线连接,与市话网连接采用 2Mbit/s 数据传输率的数字中继线方式,可采用一点/多点出/入市话网。

2.3.2.1 系统功能

- (1) 交换功能具有:
 - 1) 内部呼叫及出入局呼叫。
 - 2) 对市话局的自动呼入、呼出,国内和国际长途人工与自动呼入、呼出,以及话费立即通知性能。
 - 3) 将 119(火警)、110(匪警)、120(救护)特种业务呼叫自动转移至市话局的 119、110 和 120 上。
- (2) 计费功能。对国内、国际长途有权用户的长话计费采用用户自动计费方式进行计费。
- (3) 具有识别用户数据、用户传真等非话业务的能力,并能保证这类业务的接续不被其他呼叫插入或中断。
- (4) 具有 ISDN 交换能力,有 30B+D、2B+D 数字用户接口,能与分组交换网连接。
- (5) 具有多方会议电话能力。
- (6) 具有下列各种新业务功能,见表 2.6-9。

表 2.6-9 新业务功能			
项号	功 能	项号	功 能
1	缩位拨号	9	遇忙回叫
2	热线服务	10	恶意呼叫追查
3	出局呼叫限制	11	呼叫等待
4	免打扰	12	会议电话呼叫
5	转移呼叫	13	优先分机插入
6	三方通话	14	强插防止
7	叫醒服务	15	预先录音通告
8	缺席用户服务		

(7) 维护管理功能。用户数据(号码、等级)和局数据(路由计划、电路数)的更改;硬、软件故障诊断、告警显示和记录,确定故障范围和性质并打印,必要时可由中心采集诊断结果;性能测试及自动记录并打印;话务统计及自动记录并打印;移动通信接入功能;在中心能对系统进行集中维护和管理。

2.3.2.2 公务电话交换网构成方式

目前,车站用户线路已经利用光缆数字传输通道提供,

网内交换机选址已不再受车站地理位置的限制,只需要考虑负荷集中、便于管理的地点设置交换机。

目前国内地铁公务电话系统组网主要采用以下3种方式:

(1) 组建地铁专用公务电话系统。在控制中心及车辆段/停车场(本地电话用户密集地)分别设置程控用户交换机,交换机之间通过2Mbit/s数字中继两两相连。本地用户通过电缆方式接入就近交换机;各车站电话用户通过光传输设备以远端用户模块(用户小交换机)或接入设备提供的远端用户方式接入交换机。与公网连接采用数字中继方式,主要采用一点集中出入、分散出集中入、分散出入3种形式。该方式组网可形成交换机间迂回保护路由,可提高整个内部电话网的可靠性,是目前应用较为广泛的组网方式。

(2) 利用公用电信网构成虚拟网。在控制中心及车辆段设置公网交换机远端用户模块就近接入公网局用交换机。各车站自动电话用户通过电缆接入临近的公网局用交换机。由同一台公网局用交换机引出的用户组成一个虚拟子网,该网可以由多个虚拟子网组成,各虚拟子网之间通话通过公网实现。

(3) 公务、专用一体化方式。即采用公务电话、专用电话两网合一的方式,在每个电话交换节点上只设置一台交换机(交换模块),完成公务电话交换和专用电话交换双重功能。

以上3种方式均可实现号码直拨及电话网内各种新的功能,包括ISDN功能。

2.3.2.3 车站用户接入方式

车站公务电话用户通过光传输系统接入所归属交换机,接入方式主要有用户接入和中继接入两种形式。接入方式不同,其传输接口、车站设备配置也不同,有如下两种方式:

(1) 用户接入方式。即通过接入设备提供的Z接口,将交换机用户线直接延伸至车站。用户接入方式简单易行,但需要传输系统提供大量Z接口板,系统扩展不灵活。

(2) 中继接入方式。即通过传输系统提供的2Mbit/s数字中继接口,使交换机与设在车站的小交换机星形相连。

中继方式需要在车站设小交换机或交换模块,但可节省大量Z接口板,系统扩展方便灵活。

2.3.2.4 交换机主要性能要求及参数

数字程控交换机应具备ISDN功能、会议电话、确保非话业务不中断、完善的网管功能、各种信令(地铁交换网或市话局相连)等功能,因此交换机应符合下列要求:

(1) CPU双重热备与呼叫占用次数有关的公用设备的能力,应按正常负荷呼叫数的1.5倍考虑;能接收和储存不少于22位号码;能对用户区分等级;话务处理能力需满足交换机远期容量需求。交换机系统可用性大于或等于99.99%;系统平均无故障时间大于或等于80000h。

(2) 设备具有严格的接口规格,确保在改变信号方式或引入新的组件时,不影响原有交换系统的服务。

(3) 软件采用分层模块化结构,程序接口清楚,在修改和更改软件模块时,不影响其他软件模块;在线版本升级不需停机。

(4) 交换系统对过电压和过电流的保护性能应满足ITU-T K.20建议要求,并应符合TY/T 695—1993《市话通信系统过压过电流防护技术要求》和YD/T 993—1998《电信终端设备防雷技术要求》。

2.3.2.5 编号方式

通常,公务电话系统编号可按如下方式:

(1) 首位号码分配。“0”为市话出引示号;“1”为特种业务、新业务首位号码;“2~9”自动电话用户首位号。

(2) 用户号码分配。公务电话网采用统一5位编号,首位号码应根据网内交换机统一设置。

(3) 对外编号方式。对外与市话统一采用8位编号,编号方式适应电信局统一编号方式;入局呼叫采用直拨方式,出局呼叫采用拨引示号。操作人员可方便修改电话的编号方式。

2.3.2.6 网同步

在轨道交通中,公务电话网采用主从同步方式,受市话局同步信号控制。在正常情况下,控制中心程控交换机从市话公众交换网提取时钟信号,接受同步控制;车辆段及停车场的程控交换机同步于控制中心程控交换机,当本系统交换机与市电信局间链路发生故障时,则以控制中心的程控交换机为主局,车辆段及停车场的程控交换机为从局。

2.3.2.7 中继方式及信令

交换网内的交换机之间采用标准的数据传输率为2Mbit/s数字中继线连接。局间信令采用7号信令或专用信令。

模拟电话用户信令采用双音多频信令方式。

数字电话用户接口应符合ITU有关2B+D接口的建议。

2.3.2.8 与市话网连接方式

公务电话系统与市话网的连接主要有如下3种方式:

(1) 一点集中出入市话,即控制中心一点集中出入市话网。

(2) 分散出集中入市话,即控制中心一点入、控制中心/车辆段/停车场出市话网方式。

(3) 分散出入市话,即控制中心、车辆段、停车场3点出市话的方式。

与市话局交换机之间采用标准的数据传输率为2Mbit/s数字中继线连接,全自动方式,接口信令需与市话局协商后确定。市话中继线路及设备的设计一般由市话局设计部门完成。

2.3.2.9 主要公务电话设备

(1) HiPath 4000系统与HiPath 3800系统。HiPath 4000系统采用模块化结构,控制处理方式为多级处理、功能分担,为保证系统长期稳定运行提供了一个坚实的基础。HiPath 4000在提供电路交换的基础上又融入了IP功能,可提供丰富的IP功能的应用。其系统结构如图2.6-18所示。

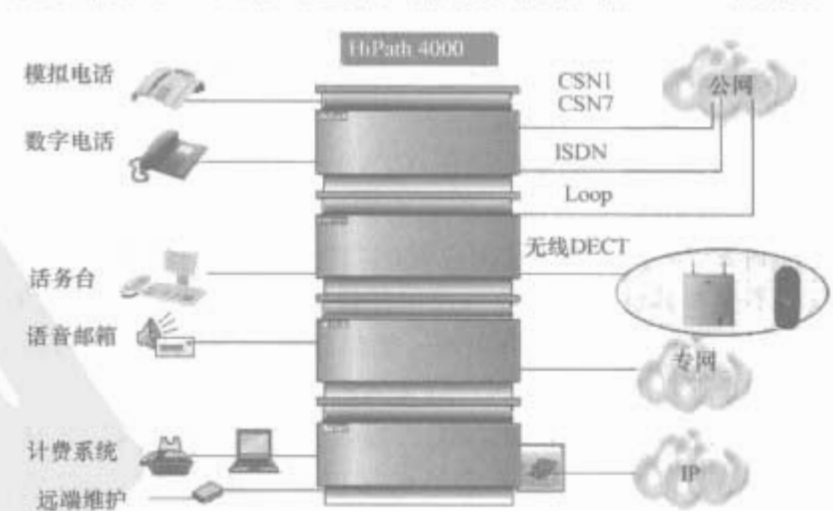


图 2.6-18 HiPath 4000 系统结构

HiPath 4000 V2.0系统中央控制部分采用全双工热备配置。在主机柜配置3块中央处理板DSCXL,其中两块

DSCXL 板互为热备,每块电路板均包括交换单元、会议信号单元 RTM,另一块 DSCXL 板作为系统管理和维护。系统存储单元为 40G 硬盘和 1.3G 的 MO 磁光盘,此两者也互为备份。主控机框还配置两块二次互为备份的电源模块。

扩展机框的线路控制板 LTUC 分别连接至主机框的主控制侧和备用控制侧,并且 HiPath 4000 所有的扩展机框也是左右各设一个电源装置,组成全双工热备结构。借助 HG 3530 网关,HiPath 4000 可分布以太网上的 IP 终端。同时,通过 CorNet-NQ 协议保持系统的所有桌面功能。

HiPath 3800 系统是一个模块化结构,随着用户需求的增长,可通过增加板卡或机框,扩展至最高 384 路分机线。HiPath 3800 安装在 19in 机架。一个 HiPath 3800 系统最多可包含 3 个机框。

(2) OmniPCX Enterprise (简称 OXE)。OXE 交换机是电信级的通信系统,交换机单呼叫处理系统的忙时呼叫处理能力的实际的测试结果达到 45 万 BHCA,忙时呼叫处理完成达到 15 万 BHCC。OXE 交换机采用水晶体结构,即机架内每个槽口和其他槽口通过后板点点互联。此交换结构可以保证在机架内的每个用户端口处理能力达到 1 爱尔兰 (Erlang)。

OXE 交换机采用水晶体结构设计,全分散控制方式。所有电路板以全连通方式相连,并由 CPU 控制。将处理器、交换网络矩阵、铃流、双音频接收器、电源、会议功能分布到每块电路板,电路板的处理器管理电路板的通信。

OXE 交换机提供两组 29 方会议,用户可将 1 组 29 方会议分组为 4 个 6 方会议或两组 14 方会议。

2.3.3 专用电话系统 (含调度、站内、站间、轨旁)

轨道交通专用电话系统是指除公务电话之外,为工作人员提供用于调度指挥、运营维护等业务的专用系统。主要包括调度电话、站内电话、站间电话和轨旁电话等。

2.3.3.1 系统功能

(1) 调度电话功能。专用直达调度电话系统为列车运营、电力供应、防灾救护及维修等提供指挥手段。在紧急情况下或列车自动控制系统出现故障时,调度电话系统尤为重要。调度电话系统的构成必须与行车组织和业务管理体制相适应。根据地铁运行组织和业务管理、指挥的需要,调度电话应按如下要求设置:

- 1) 行车调度电话。
- 2) 电力调度电话。
- 3) 防灾环控调度电话。
- 4) AFC 调度电话。
- 5) 总调度电话。

调度电话系统总机与分机间采用辐射方式连接。调度电话系统应具备以下功能:

1) 总机能单呼、组呼和全呼分机,在任何情况下均不能发生阻塞,从而完成控制中心行车调度员、电力调度员、防灾环控调度员、AFC 工作人员及总调与车站 (段) 相关值班员之间的直接通话。

2) 当分机呼叫总机遇忙时,应有忙音。分机具有紧急呼叫功能。总机应能显示呼出参加组呼的分机。

3) 总机之间应有台间联系功能。

4) 分机之间不允许呼叫和通话。

5) 总、分机之间通话应能自动录音,并能记录通话日期、起止时间等。

(2) 站内电话功能。地铁站内电话是为车站值班员办理

行车业务用的专用通信设备。车站值班员 (车辆段信号楼值班员、运转值班员、列检值班员等) 与本站 (段) 重要部门有关人员之间直达通话。

(3) 站间电话功能。站间电话是为车站值班员办理行车业务用的专用通信设备。车站值班员通过站间电话与相邻车站值班员进行业务联系。

(4) 轨旁电话功能。该电话为区间工作人员提供与控制中心调度员及相邻车站值班员的通信服务。

2.3.3.2 调度电话系统构成方式

轨道交通专用电话系统有 3 种组网方式。

(1) 采用主、分系统组网。采用主分系统的调度交换机数字专用通信系统,该系统由中心调度专用交换机、中心调度台和车站调度专用交换机、车站操作台及调度终端设备等组成,各分系统以 2Mbit/s 方式接入中心主系统。

中心调度台采用带有多个直通键式调度台或 PC 式调度台,以 2B+D 口接入调度交换机。中心调度台通过中心调度专用交换机、传输设备、车站调度专用交换机与车站操作台构成调度通信。

车站值班操作台采用带有多个直通键式调度台,以 2B+D 口接入调度专用交换机;车站调度专用交换机具有交换功能,采用该系统时,只需在车站调度专用交换机接入分机即可实现站内站间直通电话功能。

在相邻车站调度专用交换机之间设模拟中继,利用区间电话电缆相连,以保证在光传输通道中断情况下站间电话畅通。

各站 (段) 调度分机设置:

1) 行车调度分机,设于各车站控制室和车辆段通号楼运转室等处。

2) 电力调度分机,设于各车站和车辆段变电所及各 10kV 开闭所。

3) 防灾环控调度分机,设于各车站值班室、车辆段通号楼消防值班室及各 10kV 开闭所消防值班室。

4) AFC 调度分机,设于各车站综合控制室 AFC 工作台及维修培训中心等处。

5) 总调分机,设于各车站站长室和车辆段/停车场段级调度室。

该方式系统构成功能明确,与公务电话系统互不影响,单独维护管理,以专网应用较多。

(2) 公务、专用一体化。在控制中心、车辆段分别设置具有调度功能的数字程控交换机,接入终端包括本地公务电话用户、控制中心调度台和车辆段操作台及专用用户。在车站及停车场分别设置小容量调度交换机,接入终端包括本地公务电话用户、车站/停车场操作台及专用用户。

该方式中,控制中心、车辆段、停车场分别设置具有调度功能的数字程控交换机,既具有公务电话系统功能,又具有调度电话功能,称其为一体化方式。该方式要求专用电话系统具有高可靠性。通常采用以下保护设计:

1) 控制中心和车辆段分别设置具有调度功能的数字程控交换机互为主备机。当中心调度交换机发生故障时,由车辆段调度交换机承担中心调度指挥功能。中心调度台在接入控制中心交换机的同时,通过传输系统提供 2B+D 通道接入车辆段交换机,以保证中心调度台通过车辆段交换机进行电话调度。

2) 在相邻车站调度交换机之间设模拟中继,利用站间电缆相连,保证在光传输通道中断时站间电话畅通。

3) 在车站行车值班员处通过传输 Z 接口设调度备用分

机,当车站交换机故障时,车站值班员可通过调度备用分机与中心调度联络。

(3) 电话集中机方式。由调度交换机、调度台、调度分机,以及维护终端、录音设备、电话集中机等组成。

在控制中心设置调度专用交换机,各调度操纵台采用带多个直通键式调度台或电脑式调度台,以 2B+D 口接入调度交换机;各站调度分机为模拟电话机,其通过传输网提供的通道(辐射式)接入调度专用交换机。各站(段)调度分机设置同主、分系统方式。

在车站的通信机房设置电话集中主机。在站段值班室设站内电话总机,站内相关部门设站内电话分机,即实现站内电话;相邻站间的电话总机通过数字传输话路相连,即构成站间行车电话。在各开闭所与相关地方变电所之间设直通电话。

2.3.3.3 站内、站间电话构成方式

在车站/车辆段/停车场行车值班员处设多按键电话终端(值班台),接入本站专用电话分系统,相邻车站值班台通过上下行呼叫按键实现站间电话功能。

在车站/车辆段/停车场相关处所设置站内电话分机,站内电话分机通过音频电缆接入本站专用电话分系统,实现与车站值班员的站内电话功能。

2.3.3.4 轨旁电话构成方式

在上、下行区间,每隔一定距离(地下区间 150m,地上及高架区间线路 200m)设置一个轨旁电话插销盒或轨旁电话机(暂按轨旁电话机方式),通过区间电缆接入邻站专用电话分系统,实现沿线作业人员与相邻车站值班员或中心调度员的直通电话。

2.3.4 无线通信系统

城市轨道交通无线通信系统是城市轨道交通通信系统的重要组成部分,对保证正常运营,提高服务质量,维持社会治安和抢险救灾具有至关重要的作用。专用无线通信系统经历了从模拟到数字,从专用到共享,从提供单一话音业务到提供综合业务的发展过程。

根据中国电子行业标准 SJ/T 11228—2000《数字集群移动通信系统体制》的规定,数字集群系统有两种体制:iDEN(integrated digital enhanced networks)和 TETRA。iDEN 数字集群系统是 800Mbit/s 数字集群移动通信系统,具有大容量、大覆盖区、高保密和高通话清晰度的特点。该系统具有蜂窝无线电话、调度通信、无线寻呼台及无线数传功能,是运营商建设共网的首选。TETRA 数字集群通信是欧洲电信标准协会(ETSI)制定的多功能数字集群无线电标准,采用 TDMA 多址方式,提供集群、非集群话音、电路数据、短数据信息、分组数据业务和直通模式(移动台对移动台)通信。系统具有兼容性、开放性好、频谱利用率高和保密功能强等优点,是目前国际上较为先进、参与生产厂商较多的数字集群标准。TETRA 具有调度功能完善、产品选择余地大、技术先进的特点,适合于专业调度通信网。经过多年的运用,技术进一步成熟,已由最初的基于电路交换过渡到基于分组交换,在数传功能上更加强大,其二次开发能力也得到了很大提高。TETRA 和 iDEN 制式比较参见表 2.6-10。

表 2.6-10 TETRA 和 iDEN 制式比较		
项 目	TETRA	iDEN
性能价格比	最高	低
网络基础设施费用	一般	贵

续表		
项 目	TETRA	iDEN
用户设备费用	一般	较低
运营费用	低	最贵
规模生产降价速度	最快	快
标准的公开性	公开	保密
结构的开放性	开放	不开放
多供选用的厂家	多	少
多类专业网的设计、建造和运营	从小容量到大容量	仅适合大容量
易引入新技术和应用	易	不易
利于国内开发生产	利于	不利
技术的先进性	先进	先进
产品的成熟性	成熟	成熟
系统的灵活性		
基本调度功能	满足	不满足优先级
加密	满足	无加密
直通模式	有	无

目前,国内的轨道交通建设已经将数字集群通信系统 TETRA 技术作为专用无线通信系统的首选。

TETRA 是欧洲提出的基于集群的技术体制,主要应用于专用集群系统,也可组建公用集群系统。调度功能较多,补充业务丰富,支持直通工作方式,具有空中接口加密和端对端加密功能。

TETRA 的主要技术参数见表 2.6-11。

表 2.6-11 TETRA 的主要技术参数	
参 数	指 标
信道间隔 (kHz)	25
调制方式	4DQPSK
调制信道数据传输速率 (kbit/s)	36
语音编码数据传输速率 (kbit/s)	4.8 (ACELP)
接入方式	TDMA (4 个时隙)
用户数据传输速率 (kbit/s)	7.2 (每时隙)
数据传输率可变范围 (kbit/s)	2.4~28.8

2.3.4.1 系统组成

轨道交通专用无线系统组成一般包括 5 个部分:中心交换子系统、线路基站子系统、终端、射频延伸部分和天馈部分。

中心交换子系统是轨道无线系统的核心,完成无线信息的处理、交换和控制。中心交换子系统主要包括中心交换机、接口及控制单元、数据服务器、编解码器、互联互通单元、鉴权单元、网络管理设备及调度单元。调度单元包括本地调度单元和远端调度单元。

线路基站子系统是系统的接入部分,完成射频信号及基带信号的转换,提供空中接口,满足用户无线接入网络。基

站子系统包括基站控制器和射频单元,基站控制器完成基带信号处理及控制,射频单元完成基带信号的调制及发射及射频信号接收、解调等。

用于轨道交通的 TETRA 系统终端包括移动手持台(单工和双工)、车载台和固定电台。移动手持台用于轨道交通的移动人员,如车站移动巡视人员、线路及车辆段维修人员等;车载台用于运营线路旅客列车、轨道牵引车、轨道检测车、供电检修车及调车机车等;固定台供车站值班员、车辆段运转室值班员使用,设置在车站综控室和车辆段运转室。其中,移动手持台和车载台属于移动终端,固定电台属于固定终端,中心部分的调度单元也可以归属为终端的一种,只是其功能更强。用户通过终端和基站子系统接入 TETRA 网络,实现通话和其他信息传送功能。

射频延伸部分为基站子系统射频单元的延伸,用于长隧道区间在射频信号的衰减不能满足覆盖要求的情况下进行信号中继覆盖,也可以用于轨道交通沿线的信号补盲,如用于控制中心大楼信号覆盖,车辆段及停车场信号盲区覆盖等。用于射频延伸的设备主要有射频干线放大器和光纤直放站。射频干线放大器接收信号覆盖区域边缘的微弱信号进行放大,以此延伸信号的覆盖范围;光纤直放站采用耦合基站射频信号之后进行电光变换,转换成光信号通过光纤进行远距离传输,将信号延伸到需要覆盖的盲区区域,进行光电转换还原为射频信号,对盲区进行信号场强覆盖。应综合考虑需要覆盖的区域大小、放大器增加后的噪声效应、网管的复杂程度和工程实施的条件来选用射频干放和光纤直放站。

天馈部分包含天线、馈线和漏泄同轴电缆。天线一般包括基站天线、隧道口板状天线和室内吸顶天线。在部分地铁线路,车站固定台信号的接收使用鞭状天线。

2.3.4.2 系统结构

城市轨道交通是以线路为中心的链状区域,同时设有独立的线路控制中心。其无线通信系统的建设一般采用单区网,由一套控制中心设备和多个基站设备组成通信网络。

系统中心设备设置在线路控制中心,通过电话互联网关和轨道交通公务电话系统的程控交换机,或接口设备和本地调度台,或传输系统提供的传输链路和远端调度台、基站互联。

集群基站设备设置在线路沿线车站,通过基站天线对停车场、车辆段、控制中心大楼等进行覆盖;在城市边缘地区的非地下线路、车站等也可以采用基站+天线的方式覆盖;对于地下车站、地铁隧道等地下区域,采用漏泄同轴电缆覆盖;在站厅、换乘大厅等区域,采用吸顶小天线+同轴馈线的方式覆盖。

对于具有多条城市轨道交通的线路,各条线路设备选型采用了不同的厂家设备。如要实现车辆混跑、调用共享,需要各线路无线系统基于 TRTRA-ISI 标准的互联互通,实现调度业务的互通。但目前,在国内基于 TETRA-ISI 标准的互联尚无成功经验。

2.3.4.3 系统功能

(1) 通话功能。专用无线通信系统提供的通话方式主要有私密呼叫(选呼)、组呼、通播组呼叫和紧急呼叫。通话功能应至少满足如下几方面的通话:

1) 中心行车调度员与在线列车司机之间的通话,通话方式通常采用组呼(半双工)方式,也可以采用私密呼叫方式。

2) 车站值班员与在线列车司机之间、车站值班员与站内移动值班人员之间的通话,通话方式采用组呼(单工)方

式,也可以在调度员手动转接或授权情况下的自动转接完成私密呼叫。

3) 列车司机之间的通话。在授权情况下自动转接选呼,或在调度员手动转接情况下进行选呼。

4) 中心防灾(环控)值班员与相关移动人员之间通话通过组呼(半双工)方式进行通信,相关移动人员之间在授权情况下为私密呼叫或组呼(单工)通话。

5) 中心维修值班员与移动维修作业人员之间通过组呼(半双工)方式进行通信,移动维修作业人员之间在授权情况下为私密呼叫或组呼(单工)通话。

6) 车辆段信号值班员与车辆段内列车司机之间通过组呼方式(半双工)或者单呼(双工)通话;车辆段运转室值班员和列车司机之间通过组呼方式(单工)通话。

7) 车辆段值班员与车辆段内持便携台作业人员之间通过组呼(半双工)方式通话。

8) 车辆段内持便携台作业人员之间在授权情况下进行组呼(单工)或选呼通话。

9) 有线电话用户与无线用户之间通过调度员的转接通话。

10) 有线电话用户和调度员之间进行受控通话。

11) 不同组成员之间通过调度台转接的跨组通话。

专用无线通信系统在满足城市轨道交通运营人员之间通话的同时,还能针对不同用户提供如下系统功能:

1) 多级优先功能。用户优先的顺序为紧急呼叫、行车调度、防灾调度、维修、一般用户,调度通信可强插正在通话的一般用户。

2) 其他通话功能有呼叫转移、呼叫转接,直通模式呼叫,呼叫限时,状态呼叫,紧急呼叫,来电显示,自动重拨,缩位拨号,授权用户监听,车次号、车组号呼叫,列车归属转换。

(2) 数据传送功能。系统在通话过程中可提供电路模式数据交换传送(7.2~28.8kbit/s),短数据传输或分组数据传送。

利用系统数据传送功能可以在移动终端之间、移动终端和固定用户之间进行短消息文字传送。随着系统 IP OVER TETRA 功能的加强或 TETRA OVER IP 功能的实现,可增强系统的数据传送功能。通过系统的二次开发,可以满足:

- 1) ATS 信息传送。
- 2) 用户的状态信息传送。
- 3) 紧急告警服务。
- 4) 出、入库自检服务。
- 5) 列车状态监控服务。
- 6) 列车旅客信息系统服务。

利用数据承载功能,还可以提供数据库调阅,文本信息和文件图像传送等应用。

(3) 辅助功能。系统支持的辅助业务功能有远端调度台的接入,自动录音,空中接口加密、端到端加密,虚拟专网功能,单站集群功能,移动台关闭/复活,越区切换,调度区域选择,超越覆盖指示(声音或显示提示),组呼的迟后进入,会议呼叫,忙呼叫转移,缩位寻址等。

(4) 网络管理功能。系统能够实现有效、灵活的网络管理与控制,提供性能管理、配置管理、用户管理和安全管理功能。

2.3.5 闭路电视监视系统

闭路电视监视系统是保证轨道交通行车组织和安全的重要手段。调度员和车站值班员利用系统监视列车运行、客流

情况、变电所设备运行情况,提高行车指挥透明度。当车站发生灾情时,闭路电视监视系统可以作为防灾调度员指挥抢险的工具。

2.3.5.1 系统组成

闭路电视监视系统由图像摄取、图像显示及录制、车站控制处理、中心控制处理及显示、视频信号传输、网管等设备组成,为车站和中心两级组网。

系统由控制中心行车调度员和防灾调度员监视、车站值班员客运管理监视和司机上下车监视两大部分构成,组成一完整的两级电视监视网络。

(1) 图像摄取。根据地铁运营监视客流及列车到、发为主的特点,采用彩色 CCD 摄像机进行图像摄取。车站摄像机的安装位置需要完成对自动/人工售票处、检票口、变电站、乘客集散厅及重要地点、上下行站台、自动扶梯等处所的监视。

(2) 图像显示、控制。车站控制系统由车站视频切换控制主机、多画面处理器、字符/分配器、车站云台智能控制器、车站电视网管前端机、车站控制终端、数字录像设备、彩色监视器及隔离变压器等设备组成。

车站前端设备摄取的全部图像通过字符叠加,经视频分配放大器将每一路视频信号分成多路,将图像信息提供给车站视频切换控制主机、车站录像设备、视频光传输网络、公安视频监控网络等。

车站值班员通过车站控制键盘任意选取画面,利用彩色监视器画面监视本站情况,并可遥控车站的任一云台摄像机。车站录像设备负责录制本站所有视频摄取画面,为事后调查、分析提供可靠证据。

中心系统由视频分配设备、中心录像设备、中心各调度员控制终端、监视器、中心网管等设备组成。

(3) 图像录制。在每站设置一台数字硬盘录像机,站内摄像机的模拟图像信号与车站录像机之间采用同轴电缆连接。

(4) 视频信号及控制信号的传输方式如下:

1) 本地传输。在车站内部,控制信号通过控制电缆传输至各系统车站值班员室。视频信号通过视频同轴电缆传输至站内监控终端。

2) 远距离传输。视频信号的远程传输主要是指各车站向控制中心传送图像信息。数字视频远端传输技术通常包括两部分:数字视频压缩技术及视频光传输网络。

视频信号的远程传输均采用光传输方式。目前主要有两种视频光传输模式:一是采用独立光纤的模拟光视频传输模式;另一种模式为采用数字视频压缩编码方式,通过数字光传输系统提供的数字通道进行传输的模式。适用于视频的光传输网络主要有 OTN、ATM、MSTP、RPR 等传输方式。

目前采用较多的是模拟+数字传输的方式。将各车站的控制和视频信号(模拟)送入本地模拟矩阵后,输出几路进行数字压缩编码,送入传输设备的以太网接口实现共线传输,再通过传输设备送至中心。控制中心数字视频服务器首先接收中心对所需监视视频信号的需求,并依此对各个车站接入本地传输设备的视频信号进行选择;被选中的图像信号经传输系统上传至控制中心,经中心数字视频解码器解码后,输出至各调度员处设置的视频显示终端设备。

数字视频压缩技术主要包括 JPEG、MPEG1、MPEG2、MPEG4、H.261/263/264 等。从图像分辨率、带宽占用、价格等方面考虑,目前一般采用 MPEG2 编码方式。

2.3.5.2 系统功能

(1) 字符叠加功能。每台摄像机的图像均应在叠加汉字后进入视频控制切换设备。字符的内容包括车站站名、摄像机位置。字符叠加发生器要求各站通用、可互换、设置方便。

(2) 车站综合监控功能。各车站行车值班员可以通过综合监控终端及图形软件,在一台彩色监视器上循环显示或手动选择单画面或四画面。同时,在高优先级时,可以遥控本站任意一台球形一体化摄像机云台的转动及调节变焦镜头。

(3) 网络数字监控录像功能。该功能完成实时录制数字视频信号压缩,并具有动态录像功能。接收统一的标准时钟,以校准输入的图像录制时间。

图像经传输系统可以在中心进行网络回放、刻录,按录像的时间、日期范围、站名和摄像机位置进行图像分类检索,调节回放速度(如 1~25 帧/s);采用固化操作系统,防止病毒干扰;支持长时间无人值守应用。录像设备可以通过外部干接点进行实时控制录像的开启和停止,干接点的触发受控于网管系统,设备故障时能及时向控制中心和车站网管告警。该系统具有可扩展的实时视频分析应用,如可疑物品、穿越禁区报警、视频移动侦测、逆向通行报警、视频验证和变异告警识别等。

(4) 网管功能。包括:

1) 主要负责对闭路电视监视系统包含的视频设备的运行状态进行综合监视与管理,能修改系统数据及配置。

2) 故障管理。可识别系统故障,并能对闭路电视系统设备的故障进行定位及迅速查询故障;报告所有告警信号及其记录的细节;具有告警过滤和遮蔽功能;提供声光告警显示功能。

3) 系统管理。设备管理系统应能利用软件菜单对系统设备进行报警参数、报警门限数值的配置和修改,每个前端视频设备的故障报警、设备输出参数应在该操作平台上通过点击屏幕即可看到。应能自动适应光线变化,不产生误报警。

4) 录像系统管理。显示车站所有录像机的工作状态;控制车站录像状态的开启和停止及控制车站设备的录像状态;提供给网管系统录像机的各种故障报警信息等,录像机的状态也可以被中心网管系统灵活控制。

(5) 系统其他功能。包括:

1) 系统矩阵为全交叉切换方式,每路输出互不干扰,既可以选择不同摄像机的图像输出,又可以显示来自同台一摄像机的图像。

2) 分级管理功能。系统可设定云台摄像机控制的优先级,以实现不同职能操作员对同一云台控制的优先权,优先级的数量足够多且其设置灵活、可调。

3) 系统具有扩展功能。扩展时要求不影响既有设备的使用,较少地增加硬件设备,软件基本不变。

4) 时钟同步功能。具有与时钟系统的接口,接收时钟系统中心母钟提供的标准时间信息,校准本系统内所需要的时间。

2.3.6 时钟系统

时钟系统是为控制中心调度员、车站值班员、与行车相关的各部门工作人员及乘客提供统一标准时间信息。时钟系统的设置对保证地铁运行计时准确,提高运营效率及故障分析具有非常重要的作用。

2.3.6.1 系统组成

时钟系统由一级母钟、二级母钟、子钟、网管设备和传

输通道组成，采用控制中心、车站/车辆段两级组网方式。在控制中心设置一级母钟，车站/车辆段设置二级母钟；由传输系统提供的低速数据通道传送。一级母钟至二级母钟时钟信号和网管信息，母钟与子钟间通过电缆连接。

(1) 一级母钟。一级母钟设置在控制中心，可由设置在控制中心的 GPS+BITS 提供的外部标准时钟信号校准，防止产生累计误差；同时产生精确的同步时间码，通过传输通道定时向二级母钟发送时间编码信号，用以校准二级母钟。

一级母钟向安装于控制中心的中央调度室、运营办公室及与行车相关部门的子钟提供基准时间信号，同时给其他系统提供时间信号输出接口。

控制中心设置时钟系统监测管理终端设备，对时钟系统的工作状态、故障状态进行显示，能实时反映系统内部各模块状态，并能对系统的时钟进行控制。

(2) 二级母钟。二级母钟设置在各车站、车辆段、停车场通信设备室内，通过数据传输通道接收一级母钟发出的标准时间码信号，使二级母钟与中心母钟保持同步。二级母钟能够发送标准时间信号，控制驱动所在范围的子钟。二级母钟具有长期独立工作的能力，当中心一级母钟或传输通道故障时，二级母钟仍可驱动车站子钟正常工作并发出告警。

(3) 子钟。子钟设置在控制中心及各车站（车辆段/停车场）的站厅、站台、办公区域等相关地点，它接收母钟发出的时间驱动脉冲信号，进行时间信息显示。子钟脱离母钟仍能保持一定的时间精度独立运行。子钟分为模拟指针钟和数字显示钟两种。

2.3.6.2 时钟系统主要技术指标及参数

(1) 一级母钟。一级母钟配有年、月、日及时、分秒显示，它具有数字式及指针式子钟输出接口，高稳晶振工作钟采用主备用方式，主备工作钟能自动、手动倒换，可人工调整时间。一级母钟设备具有故障告警功能，并将故障告警信号送至时钟系统网管设备。一级母钟技术参数见表 2.6-12。

表 2.6-12 一级母钟技术参数

参 数	指 标
稳定度	1×10 ⁻⁹
同步计时精度 (μs)	±1
准确度	1×10 ⁻⁸
脱开同步时的日波动	1×10 ⁻⁸
车站与中心时钟数据误差精度 (ms)	<10

(2) 二级母钟。二级母钟配有年、月、日及时、分、秒显示，驱动子钟，它具有数字式及指针式子钟输出接口，具有故障告警功能，并将故障告警信号送至时钟系统网管设备。二级母钟技术参数见表 2.6-13。

表 2.6-13 二级母钟技术参数

参 数	指 标
累积误差 (s/月)	±1 (自走时)
传输距离 (km)	最远不小于 1.2

(3) 子钟。子钟有时、分、秒显示，显示应清晰，当二级母钟发生故障时，子钟可脱网独立运行。子钟技术参数见

表 2.6-14。

表 2.6-14 子钟技术参数

参 数		指 标
累积误差 (s/周)		±2
发光强度 (mcd)	室内	25
	室外	35
寿命 (h)		>10 万

2.3.7 广播系统

有线广播系统在正常状态下具有控制中心调度人员及车站值班员向乘客通告地铁列车运行及安全，向导等服务信息及向车站和区间工作人员发布作业通知的作用；在灾害状态下具有控制中心调度人员及车站值班员向乘客发出通告并指挥疏导乘客的作用。

广播系统采用控制中心与车站/车辆段/停车场两级组网方式。在正常状态下，广播系统采用车站广播和中心广播两种方式。广播系统能进行优先级设置。通常，广播控制优先级设置分为中心防灾值班员、中心行车调度员、车站防灾值班员、车站行车值班员、站台客运值班员。

中心调度员和车站值班员通过广播操作台控制广播系统广播功能。广播操作台具有话筒、语音、线路等按键。选中话筒，可以通过话筒对相应的广播区进行广播；按语音按键，可以选中语音合成广播，通过选择语音合成的段号对车站广播区进行固定广播；按线路按键，可以通过线路输入插口，连接 CD 机等信源，播放线路输入的内容。

中心行车调度员可以通过单选、组选和全选任意车站的任意广播区进行广播；根据需要可以选择监听任意车站的广播情况。车站防灾广播操作盒设有“紧急”广播按键，车站防灾值班员通过按下“紧急”按键，可以对全区或分区进行紧急广播，同时记录广播的内容。车站值班员可以单选、组选和全选本站的任意广播区进行多信源广播；根据需要可以选择监听本站的各广播区的广播情况；显示屏可以显示优先级的占用状态、设备的工作状态、故障情况、广播区及信源选择等内容。客运值班员可以通过便携式站台广播控制盒，在站台内任一位置，遥控广播的开启，对站台区域进行临时语音广播。

列车进站自动广播。车站广播接收信号系统的控制信息，自动打开对应广播区，启动语音合成播音器，实现自动广播。

车辆段广播。它为独立的广播系统，但受中心网管的监控管理。

广播系统由中心广播设备、车站广播设备、车辆段广播设备、网管设备和传输通道构成。广播系统采用控制中心与车站/车辆段两级组网方式。传输设备为广播系统提供从中心到车站宽频共线音频广播通道（广播接口带宽为 7~15kHz）和低速数据控制通道（RS422/RS485 接口），其中宽带语音通道用于控制中心向车站发送宽带语音信息（音源包括话音、音乐等），低速数据通道用于传送网管信号和控制信号。

2.3.7.1 中心广播系统组成

控制中心设置中心广播设备、录音设备和网管设备。中心广播设备由行车广播控制台、防灾广播控制台、总调广播控制台、中心广播控制机柜组成。其中，中心广播控制机柜包括与录音设备、网管设备和传输设备相连的接口设备，考虑到其他线路的接入等需求，应预留多路输出接口。

中心设置的网管设备可以实时监视系统的运行状态,记录故障信息,以便随时查询。控制中心可以对全线任意车站进行远程监测。当设备发生故障时,维护终端发出声光报警并可打印记录,提示维护人员检修。

2.3.7.2 车站广播系统组成

车站广播设备由广播机柜、车站广播控制台、站台广播控制盒、噪声检测器及扬声器网组成,其中扬声器网与车站广播区的划分一致。高架线路不设沿线区间广播;对地下线路,暂按上、下行分别设置隧道广播,并纳入相邻车站广播区。车站广播区的具体划分为上行站台、下行站台、站厅、办公区域、上行隧道、下行隧道。每一个广播区组成一个扬声器网。上行站台、下行站台、站厅广播区的扬声器采用两路跨接方式连接,当一路发生故障时,另一路能继续正常工作。

2.3.7.3 车辆段广播系统组成

该广播系统为独立的广播系统,仅接受中心广播系统网管的监视。车辆段广播设备包括广播机柜、行车广播控制台、运转室广播控制台、检修库广播控制台、防灾广播控制台及扬声器网。车辆段一般划分为停车列检库、架修库及车场3个广播区,每一个广播区组成一个扬声器网。

3 信号系统

轨道交通信号系统主要涉及行车和调车作业的调度监控、信号显示、道岔监控、列车控制、编组站自动化,以及信号系统与其他机电系统的接口等技术。随着计算机技术、网络技术、通信技术及信号自身技术的发展,信号系统已经逐渐形成完整、复杂的大系统。

该部分仅包括国内自行研发并成功运用的、以信号系统设备为主的干线铁路信号、编组站自动化及城市轨道交通信号系统。

3.1 干线铁路信号

正线铁路信号系统主要是指用于运营线路上的行车指挥与列车运行控制系统。系统通常由CTC、车站控制系统、ATP、地—车信息传输系统和列车定位系统等组成。上述各系统通过信息交换网络实现地面控制与车载控制结合、本地控制与中心控制结合,构成以安全设备为基础,集行车指挥、运行调整等功能为一体的正线铁路信号系统。

行车指挥系统通常由行车指挥中心子系统和车站分机组成。通过计算机网络技术将中心和车站的信号设备构成完整的行车指挥系统,实现列车自动识别、列车运行自动跟踪,运行时刻表或运行图的编制及管理,自动或人工排列进路,列车运行自动调整,列车运行数据统计、列车运行实绩记录等处理。本节主要介绍以自律式调度集中系统为主的行车指挥系统。

车站控制系统主要包括中心控制系统的分机设备和车站联锁、ATP地面设备等安全控制设备。联锁系统是保证列车运行经路安全的基础设备。主要任务是按一定程序和条件控制道岔、信号,建立列车或调车进路。

在铁路干线,ATP也称为列车超速防护。ATP通常包括地面区域控制中心或车站设备、轨旁设备和车载设备。轨旁设备将列车运行与列车位置信息传给车站设备,车站设备根据前方列车运行状况和线路条件确定后续列车的移动授权(movement authority, MA),通过地—车信息传输系统将MA传输给ATP车载设备,实现对列车运行的安全监控。本节未纳入列车超速防护部分,与ATP相关的内容可参见

城市轨道交通信号系统。

地—车信息传输系统是实现地面信号系统与车载信号系统设备进行信息交换的系统。信息包括地对车及车对地两类,其中地对车信息可以有列车运行前方的目标速度、目标距离和线路状态等信息;车对地信息可以有列车长度、车号、速度、列车状态与运行目的地等信息。其信息传输载体可以包括轨道电路、查询/应答器、感应环线、漏泄电缆、自由空间波等。本节的地—车信息传输系统主要是指ZPW-2000型轨道电路。

列车定位系统是保证列车安全运行、准确控制的基础。信号系统的列车定位可以采用列车自身定位和地面信标校准、轨道电路、交叉环线、无线定位等技术。列车通过车载速度/距离传感器进行列车速度和距离的测量,通过地面设置的绝对位置信标对列车走行距离进行校正,实现列车的准确定位,是目前轨道交通较为重要的定位方式。

3.1.1 轨道电路

轨道电路是利用轨道交通线路的钢轨作为导体,用以检查线路上有无列车,传递列车占用信息,并可以实现地面向列车传递信息的电路。

轨道电路是轨道交通系统列车运行现代化自动控制与远程控制系统的重要组成部分,是关系到列车运行安全的基础设备。通过轨道电路可以反映列车对钢轨线路的空闲和占用,并可以作为信号机之间、地面设备与列车车载设备之间的信息传递通道。

3.1.1.1 轨道电路的分类

轨道电路因运用环境不同,技术要求具有很大区别,有如下分类:

(1) 按所传送的电流特性分类。轨道电路可分为工频连续式轨道电路和音频轨道电路,音频轨道电路又可分为模拟式和数字编码式。工频连续式轨道电路传送连续的交流电流,该类轨道电路主要用于监督轨道的占用和空闲,不能传送更多的列车所需信息;模拟式音频轨道电路采用调幅或调频方式,以低频调制载频,除监督轨道的占用与空闲外,还可以传输约10种速度限制或列车间隔信息;数字编码/报文式音频轨道电路采用数字调频方式,采用一组若干比特的一群调制频率,根据编码调制载频。编码包含速度码、线路坡度码、闭塞分区长度码、纠错码等,可传输的有效信息以数十比特计。

(2) 按相邻轨道电路的分隔方法分类。轨道电路可分为有绝缘轨道电路和无绝缘轨道电路。绝缘轨道电路利用钢轨绝缘将相邻的轨道电路互相隔离。钢轨绝缘在车辆运行的冲击力、剪切力作用下易破损。轨道电路的故障率较高,绝缘节降低了无缝线路的品质,增加线路建设的工程量和维护的复杂性。电气化牵引线路,在设置有绝缘轨道电路时,为了使牵引回流绕过绝缘节,必须安装扼流变压器或回流线。无绝缘轨道电路在其分界处不设钢轨绝缘,而采用电气隔离的方法予以隔离。电气隔离利用谐振槽路,对不同频率呈现不同阻抗,实现相邻轨道电路间的电气隔离。此外,轨道电路分类尚有按轨道电路的接线方式分为开路式轨道电路和闭路式轨道电路。

此外,按牵引电流通过方式分为单轨条轨道电路和双轨条轨道电路;按运用区域分为正线用轨道电路、站场轨道电路和驼峰编组场轨道电路,以及阀式轨道电路、移相叠加式轨道电路等类型;根据轨道电路的不同特征,可将轨道电路类别归纳,见表2.6-15。

表 2.6-15 轨道电路的分类	
轨道电路的特征	轨道电路的分类
信号电流性质	直流连续式轨道电路、交流连续式轨道电路、脉冲轨道电路、编码轨道电路
相邻轨道电路分隔方式	有绝缘轨道电路、无绝缘轨道电路（谐振隔离式、自然衰耗式）
接收器的连接方式	电压接收式轨道电路、电流接收式轨道电路
接收器的工作特征	一元接收器式轨道电路、二元接收器式轨道电路
道岔区段轨道电路连接方式	串联式道岔区段轨道电路、并联式道岔区段轨道电路
运用区域分类	正线用轨道电路、站场用轨道电路、驼峰用轨道电路
列车牵引类型	非电化区段轨道电路、电化区段轨道电路
其他轨道电路	阀式轨道电路、移相叠加式轨道电路等

3.1.1.2 轨道电路的基础

(1) 基本轨道电路。轨道电路是以铁路线路两根钢轨作为导体的特种电路。以电化区段有绝缘轨道电路为例，轨道电路动作原理如图 2.6-19 所示。

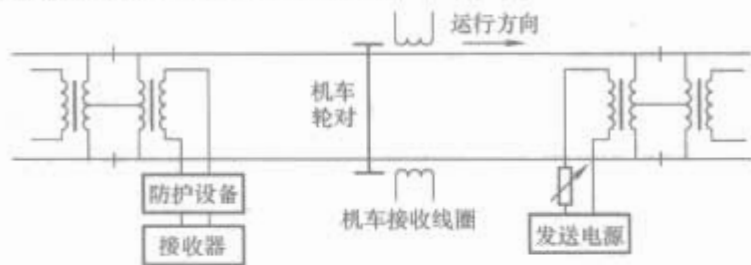


图 2.6-19 电化区段有绝缘轨道电路动作原理

轨道电路的发送设备包括发送电源、限流电阻和扼流变压器；接收设备包括设备、接收器和扼流变压器。相邻轨道电路用钢轨绝缘节加以电气绝缘，扼流变压器是为导通牵引电流而设置的。

当两根钢轨完整且无列车占用时，轨道电路接收器工作，信号开放。当列车占用轨道电路区段线路时，轨道电路发送的信号电流被列车轮对分路，使流经轨道电路接收器的电流减小，以致接收器不能工作。当装备有机车信号的机车进入轨道电路区段线路时，可以通过接收机车底部前方感应线圈下方钢轨中通过的信号电流，译解出自动闭塞信息或列车控制信息，提供给司机或列控系统。

(2) 轨道电路的基本工作状态。轨道电路按其工作时段可分为调整工作状态、分路工作状态、机车（车载）信号工作状态。调整工作状态是指轨道电路未被其他导体在传输线两端之间横向分路时设备所处的工作状态，表示轨道电路未被列车占用。轨道电路的分路工作状态是指轨道电路已被列车或其他导体在传输线两端之间横向分路时设备所处的工作状态，表示轨道电路已被列车占用。轨道电路的机车（车载）信号工作状态是指轨道电路已被列车在传输线两端之间横向分路，且车载设备在轨道电路区段内任何分路处的感应电流均能使车载信号设备正常工作的状态，该状态既表示轨道电路已被列车占用，也表示机车（车载）信号可正常工作。

3.1.1.3 ZPW-2000A 型无绝缘轨道电路

ZPW-2000A 型无绝缘轨道电路是采用音频（1700～2600Hz，4 种）作为载频，用特定低频方波信号（共 18 种）

进行移频调制向机车传送，采用谐振方式实现相邻区段信号隔离。它是在法国 UM71 无绝缘轨道电路技术引进的基础上再开发的，具有自主知识产权。该产品被铁道部确定为今后铁路发展的统一制式，已在全路推广应用。该轨道电路适用于一般轨道电路区段，也可用于重载、高速电气化区段及低道碴电阻区段。

ZPW-2000A 型轨道电路的特点是：充分吸收、保持 UM71 无绝缘轨道电路整体结构上的优势；通过调谐区断轨检查可实现轨道电路全程断轨检查；减少调谐区分路死区；实现对调谐单元断线故障的检查；实现对拍频干扰防护；通过系统参数优化，提高了轨道电路的传输长度；提高了机械绝缘节轨道电路的传输长度，实现了与电气绝缘节轨道电路等长传输；轨道电路调整按固定轨道电路长度与允许最小道碴电阻方式进行，既满足了 $1\Omega\cdot\text{km}$ 标准道碴电阻、低道碴电阻传输长度要求，又提高了一般长度轨道电路工作稳定性；利用 SPT 国产铁路信号数字电缆取代法国 ZCO3 电缆，减小铜芯线径，减少备用心组，加大传输距离，提高系统技术性能价格比，降低工程造价；采用长钢包铜引接线取代铜引接线，利于维修；系统中发送器采用“N+1”冗余，接收器采用成对双机并联运用，提高了系统可靠性。

(1) 主要技术条件。

1) 为了防止相邻轨道电路以及上、下行线路之间的相互干扰，上行或下行线路的 4 种载频是交替配置的。其频率参数见表 2.6-16。

表 2.6-16 频率参数		Hz							
载频频率 f_0	下行方向：	1701.4 (1700-1), 1698.7 (1700-2), 2301.4 (2300-1), 2298.7 (2300-2)							
	上行方向：	2001.4 (2000-1), 1998.7 (2000-2), 2601.4 (2600-1), 2598.7 (2600-2)							
低频频率 f_c	10.3	11.4	12.5	13.6	14.7	15.8	16.9	18	19.1
	20.2	21.3	22.4	23.5	24.6	25.7	26.8	27.9	29
载频频偏 Δf	± 11								

2) 在满足最低道碴电阻、最大电缆长度、分路灵敏度的条件下，轨道电路满足一次调整，无需随外界参数变化再次调整。

3) 供电电源电压采用直流 24V 集中供电，电压范围为 23.5～24.5V。

4) 接收器主轨道电压不小于 240mV，继电器电压不小于 20V；接收器小轨道电压不小于 100mV；小轨道执行条件不小于 20V。在最不利条件下，轨道电路任一处轨面机车信号短路电流不小于 500mA（当 2600Hz 时，不小于 450mA）。

5) 主轨道无分路死区；调谐区分路死区不大于 5m。

6) 有分离式断轨检查性能；轨道电路全程（含主轨道电路和短小轨道电路）断轨，保证轨道继电器可靠失磁。

7) 当送、受端电缆长度为 10000m、道碴电阻为 $1.0\Omega\cdot\text{km}$ 时，轨道电路长度可达到 1500m（当 2600Hz 时，为 1460m）。

8) 电气化牵引区段工作环境。轨道回流不大于 1000A，不平衡电流不大于 100A。

(2) 设备构成。ZPW-2000A 型无绝缘轨道电路的室内设备有发送器、衰耗盘、接收器、轨道继电器和电缆模拟网络，室外设备有数字信号电缆、匹配变压器、调谐单元、空心线圈和补偿电容，其构成如图 2.6-20 所示。

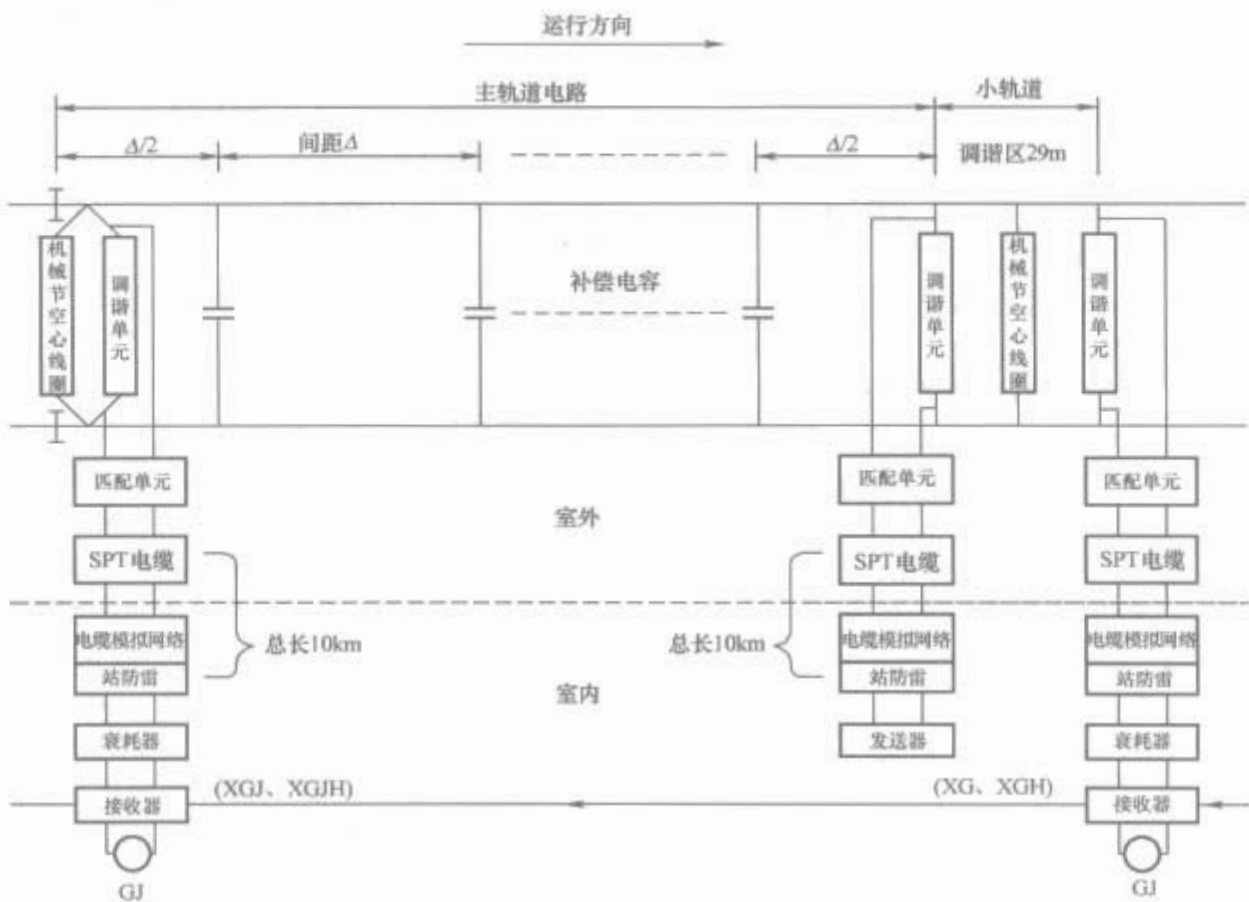


图 2.6-20 ZPW-2000A 型无绝缘轨道电路

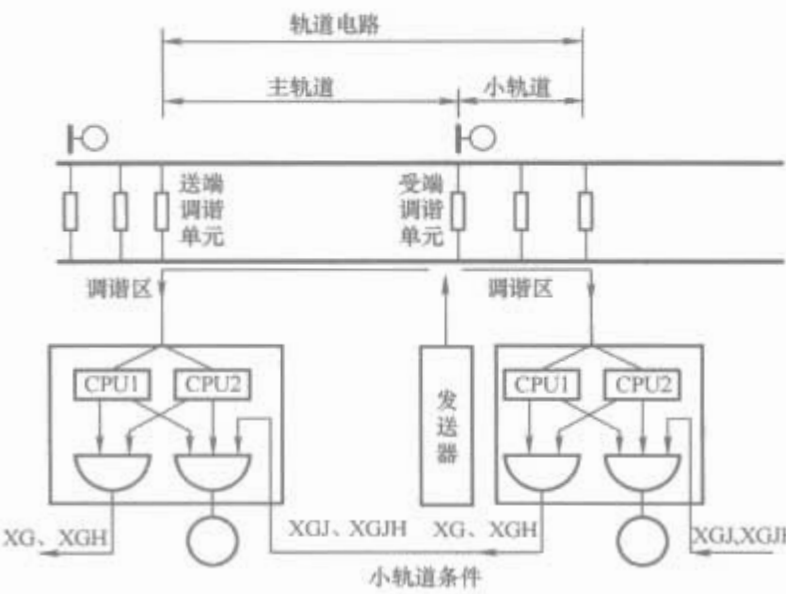


图 2.6-21 主轨道电路与小轨道电路关系示意图

ZPW-2000A 型无绝缘轨道电路将轨道电路分为主轨道电路和调谐区短小轨道电路两个部分，短小轨道电路视为列车运行前方主轨道电路所属的“延续段”。

发送器同时向线路两侧主轨道电路、小轨道电路发送信号。接收器除接收本主轨道电路频率信号外，同时接收相邻区段小轨道电路的频率信号。接收器采用 DSP 数字信息处理技术，将接收到的两种频率信号进行快速傅氏变换 (FFT)，同时获得两种信号能量谱的分布，分别判决。

上述“延续段”信号由运行前方相邻轨道电路接收器处理，并将处理结果形成小轨道电路轨道继电器执行条件 (XG、XGH) 送至本轨道电路接收器，做为轨道继电器 (GJ) 励磁的必要检查条件 (XGJ、XGJH) 之一，见图 2.6-21。

综上所述，接收器用于接收主轨道电路信号，并在检查所属调谐区短小轨道电路状态 (XGJ、XGJH) 条件下，动作本轨道电路的轨道继电器 (GJ)。接收器还同时接收邻段所属调谐区小轨道电路信号，向相邻区段提供小轨道电路状态 (XG、XGH) 条件。该方式充分利用了 CPU 的资源，保持了调谐式无绝缘轨道电路送、受电端阻抗的最佳配置。

1) 发送器。发送器产生并以一定功率发送高精度、高稳定的移频信息，供自动闭塞、机车信号和超速防护使用，可适用于非电化和电化区段站内移频电码化发送和站内移频轨道电路使用；电化或非电化 18 信息无绝缘移频自动闭塞区段及站内电码化，采用 N+1 冗余设计。通用型发送器原理框图如图 2.6-22 所示。

同一载频编码条件、低频编码条件源，以反码形式分别送入两套微处理器 CPU 中，其中 CPU1 产生包括低频控制信号 F_c 的移频信号。移频键控信号 FSK 分别送至 CPU1、CPU2 进行频率检测。检测结果符合规定后，即产生控制输出信号，经“控制与门”使 FSK 信号送至“滤波”环节，实现方波—正弦波变换。功放输出的 FSK 信号送至两套 CPU 进行输出电压检测。双 CPU 对 FSK 信号的低频、载频和幅度特征检测并符合要求后，发送报警继电器励磁，经功放的 FSK 信号输出。

当检测输出信号特征错误、低频错误、载频错误等条件时，“安全与门”停止输出，FBJ 失磁落下，使设备与电缆通道脱离，并切换至由备用的 N+1 发送器向外输出。发送器主要指标见表 2.6-17。

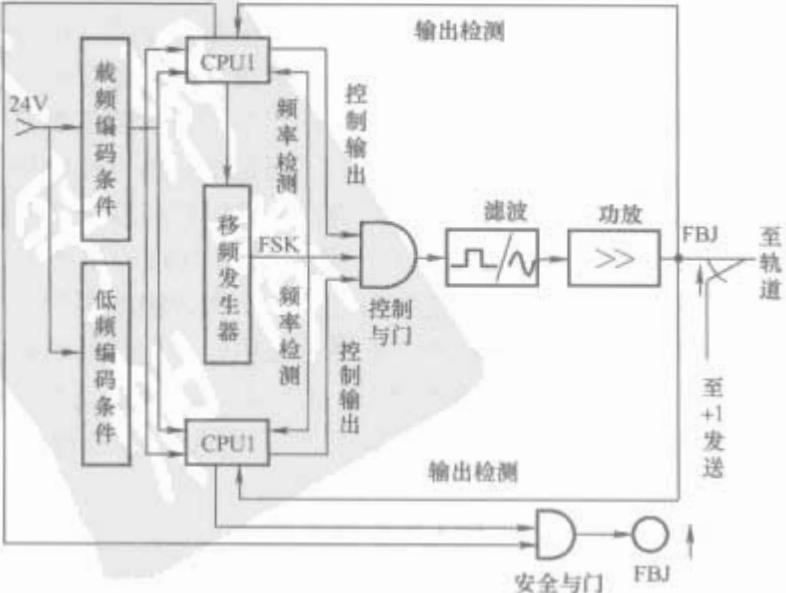


图 2.6-22 通用型发送器原理框图

表 2.6-17 发送器主要指标

项 目	指 标	备 注
低频频率 (Hz)	$F_c \pm 0.03$	F_c 为 10.3~29Hz, 共 18 个信息
载波频率 (Hz)	1700-1	1701.4 ± 0.15
	1700-2	1698.7 ± 0.15
	2000-1	2001.4 ± 0.15
	2000-2	1998.7 ± 0.15
	2300-1	2301.4 ± 0.15
	2300-2	2298.7 ± 0.15
	2600-1	2601.4 ± 0.15
	2600-2	2598.7 ± 0.15
输出电压 (V)	1 电平	161.0~170.0
	2 电平	146.0~154.0
	3 电平	128.0~135.0
	4 电平	104.5~110.5
	5 电平	75.0~79.5
发送报警继电器电压 (V)	≥ 20	直流电源电压为 $24V \pm 0.1V$ JWXC1-1700 型继电器
故障转换时间 (s)	≤ 1.6	

2) 接收器。无绝缘接收器采用成对双机并联运用方式, 用于接收主轨道电路和相邻区段发送器在调谐区短小轨道电路形成的信号, 并配合与送电端相连接调谐区短小轨道电路的检查条件, 动作轨道继电器。完成与受电端相连接调谐区短小轨道电路移频信号的解调, 给出短小轨道电路执行条件, 送至相邻轨道电路接收器。接收器接收端及输出端均按双机并联运用设计, 与另一台接收器构成对互热机并联运用系统。接收器由本接收“主机”及另一接收“并机”, 其构成如图 2.6-23 所示。

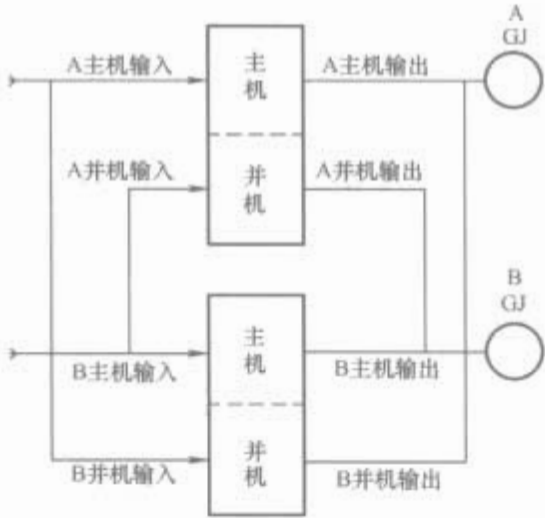


图 2.6-23 接收器由本接收“主机”及另一接收“并机”构成图

在 ZPW-2000A 系统中, A、B 两台接收器构成成对双机并联运用, 实现 A 主机输入接至 A 主机, 且并联接至 B 并机; B 主机输入接至 B 主机, 且并联接至 A 并机; A 主机输出与 B 并机输出并联, 动作 A 主机相应执行对象; B

主机输出与 A 并机输出并联, 动作 B 主机相应执行对象。接收器框图如图 2.6-24 所示。

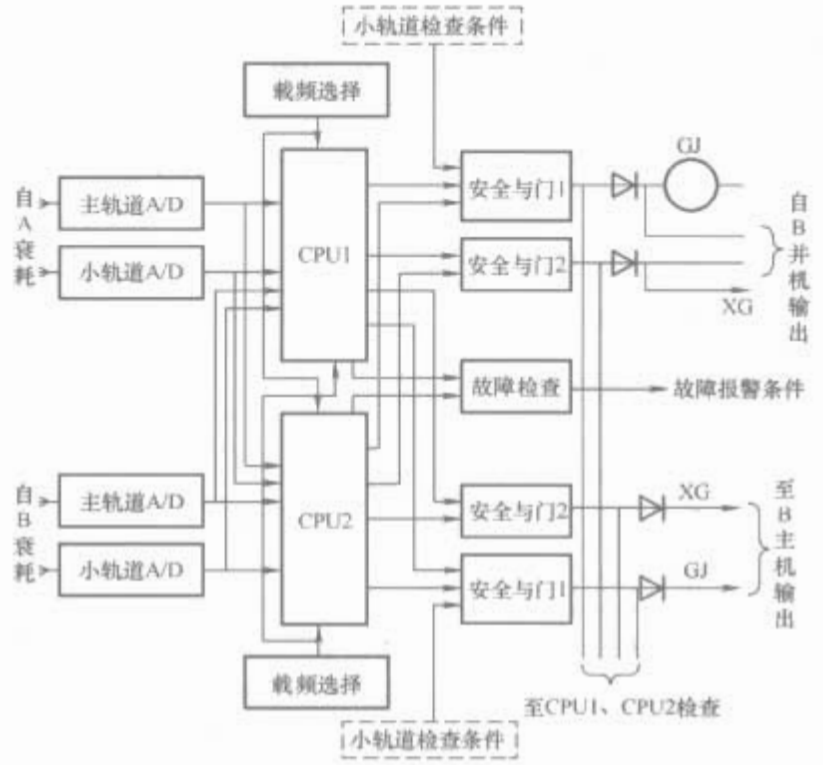


图 2.6-24 接收器框图

在图 2.6-24 中, 主轨道 A/D、小轨道 A/D 模数转换器将主机、并机输入的模拟信号转换成计算机能处理的数字信号。CPU1、CPU2 为微机系统, 完成主机、并机载频判决、信号采样、信息判决和输出驱动等功能。安全与门 1~4 将两路 CPU 输出的动态信号变成驱动继电器 (或执行条件) 的直流输出。根据要求, 载频选择电路利用外部接点设定主机、并机载频信号, 由 CPU 进行判决, 确定接收盒的接收频率。

载频通过相应端子接通 24V 电源确定, 通过光电耦合器进行隔离, 并转换成 CPU 所接收的高、低电平; 同时, 在载频电路中也增加了对载频电路的检查, 如图 2.6-25 所示, 这是其中一路载频编码条件。当 CPU 准备读取载频编码条件时, 先送一个低电平到 B, 使光耦 2 导通。如果外部有 24V 接通, 光耦导通, A 处于低电位状态; 如果 24V 未接通, 光耦截止, A 处于高电位状态。根据 A 端的电位, 即可以判断载频编码。在载频编码条件读取电路中, 为保证载频电路的完好, 增加了光耦 2, 以检查载频电路, 实现故障—安全。其基本原理是检查光耦的状态: 送一个高电位至 B, 使光耦 2 截止, 切断编码电路, 若此时光耦完好, A 应为高电位; 若光耦 1 损坏, A 应为低电位。以此, CPU 可以检查载频编码电路是否故障。如果光耦 2 故障, CPU 也会得到检测的状态信息并报警。只有确认载频编码电路完好, 且为唯一载频时, 设备方属正常。接收器技术指标见表 2.6-18。

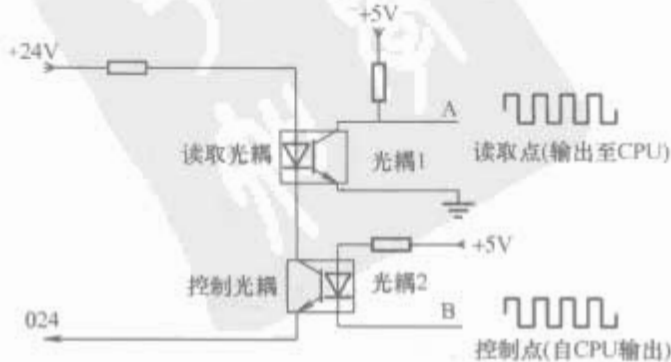


图 2.6-25 光耦检查载频电路

表 2.6-18 接收器技术指标

项 目		指标及范围	备 注
主轨道接收	吸起门限电压 (mV)	200~210	直流电源电压为 24 ± 0.1V, JWXC1-1700 型继电器
	落下门限电压 (mV)	170~180	
	继电器电压 (V)	≥20	
	吸起延时 (s)	2.3~2.8	
	落下延时 (s)	≤2	
小轨道接收	吸起门限电压 (mV)	70~80	直流电源电压为 24V ± 0.1V JWXC1-1700 型继电器
	落下门限电压 (mV)	≥63	
	继电器电压 (V)	≥20	
	吸起延时 (s)	2.3~2.8	
	落下延时 (s)	≤2	

3) 衰耗器。用于实现主轨道电路、小轨道电路的调整。给出发送接收故障、轨道占用表示及其他有关发送、接收用 +24V 电源电压、发送输出电压、接收 GJ、XGJ 测试条件。

4) 防雷模拟网络盘。防雷模拟网络盘用于模拟 SPT 数字信号电缆的参数,实现对实际电缆长度的补偿,最大模拟长度为 10km。该网络盘可以对经传输电缆引入的雷电进行纵向和横向防护。防雷模拟网络盘安装于无绝缘防雷模拟网络组匣中,每个组匣可装 8 台模拟网络盘。其组匣和防雷模拟网络盘安装于无绝缘移频自动闭塞接口柜中。

5) 无绝缘移频自动闭塞机柜。无绝缘移频自动闭塞机柜用于安装无绝缘发送器、接收器、衰耗器各 10 套。

6) 匹配变压器。无绝缘匹配变压器用于实现 SPT 数字信号电缆与钢轨之间的匹配连接及钢轨和室内设备之间的电气隔离。匹配变压器入口设置防雷单元,对钢轨引入的雷电进行横向防护。

7) 调谐单元。ZPW-2000A 型轨道电路采用电气分隔方式分隔相邻区段的轨道电路。调谐区的长度为 29m,本轨道电路利用相邻区段发送器和调谐区构成“短小轨道电路”,能够实现调谐单元断线检查。调谐单元分 1700、2000、2300、2600Hz 4 种频率。调谐单元与调谐区钢轨、空心线圈所构成的并联谐振,对于本区段频率,可呈现较高阻抗,减少对本区段信号的衰耗;对于相邻区段频率,调谐单元为串联谐振,呈现较低阻抗,阻止相邻区段信号进入本轨道电路区段。主轨道无分路死区,调谐区分路死区不大于 5m。图 2.6-26 所示为调谐单元示意图。

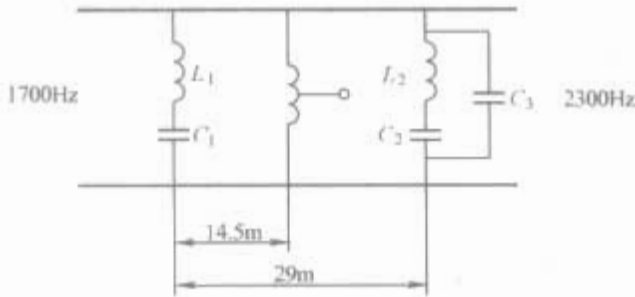


图 2.6-26 调谐单元示意图

电气绝缘节在两端各设一个调谐单元,对于较低频率轨道电路(1700、2000Hz)端,设置 L_1 、 C_1 两元件的 f_1 型调谐单元;对于较高频率轨道电路(2300、2600Hz)端,设置 L_2 、 C_2 、 C_3 三元件的 f_2 型调谐单元。

$f_1(f_2)$ 端调谐单元的 L_1 、 $C_1(L_2C_2)$ 对 $f_2(f_1)$ 端的频率

为串联谐振,呈现较低阻抗,称“零阻抗”,相当于短路,可以阻止相邻区段信号进入本区段。 $f_1(f_2)$ 端调谐单元对本区段的频率呈现电容性,并与调谐区的钢轨、空心线圈的综合电感构成并联谐振,呈现高阻抗,称“极阻抗”,相当于开路,减少了对本区段信号的衰耗。调谐单元与空心线圈、29m 钢轨电感等参数配合,实现相邻轨道电路信号的隔离,即完成“电气绝缘节”功能。

8) 空心线圈。空心线圈用于平衡钢轨中的牵引电流,减少工频谐波对轨道电路设备的影响,改善电气绝缘节 Q 值,保证调谐区的工作稳定性。该线圈用 19mm×1.53mm 电磁线绕制,其截面积为 35mm²,电感约为 33μH,直流电阻为 4.5mΩ。中间点引出线作等电位连接用。轨道电路具有空心线圈和机械节空心线圈(SVA')机械节空心线圈分 4 种频率,与相应频率调谐单元相并联,可以获得与电气绝缘节阻抗相同的效果。

9) 补偿电容。补偿电容补偿钢轨电感所导致的无功功率损耗,优化传输通道,减小长轨道电路在钢轨上的功率损耗。优化过的钢轨传输通道相对于旁路的第三通道呈现更小的阻抗。当主通道故障时,旁路无法替代它的传输性能,使接收端无法得到正常情况下的信号能量,从而达到断轨检查、同侧钢轨双端接地安全防护等功能。这是这种制式轨道电路保证安全的关键点。ZPW-2000A 型无绝缘轨道电路在钢轨线路沿线按等间距方法设置补偿电容。当载频为 1700Hz 时,补偿电容值为 55μF;当载频为 2000Hz 时,补偿电容值为 50μF;当载频为 2300Hz 时,补偿电容值为 46μF;当载频为 2600Hz 时,补偿电容值为 40μF。

(3) 电气化区段的等电位连接及防雷设计。为保证电气化区段回流畅通、线路作业人员的人身安全及设备雷电防护要求,在线路间做等电位连接。等电位连接存在以下几种类型:

- 1) 简单横向连接。两轨道间的等电位连接,不直接接地(通过防雷元件接地)。
- 2) 完全横向连接。两轨道间的等电位连接,并接地。
- 3) 用于牵引电流返回的完全横向连接。这是一个完全横向连接,同时提供牵引电流回流线的连接。横向连接线设置标准为:①轨道接地必须通过完全横向连接。②完全横向连接的间距不小于 1500m,而且中间必须不少于两个轨道电路区段,如图 2.6-27 所示。③当两个完全横向连接的距离大于或等于 2000m 时,两者之间增加一个简单横向连接。简单横向连接之间的距离不得小于 1000m。④如果两个轨道电路终端不能通过绝缘节方式完成横向连接,可以通过增设

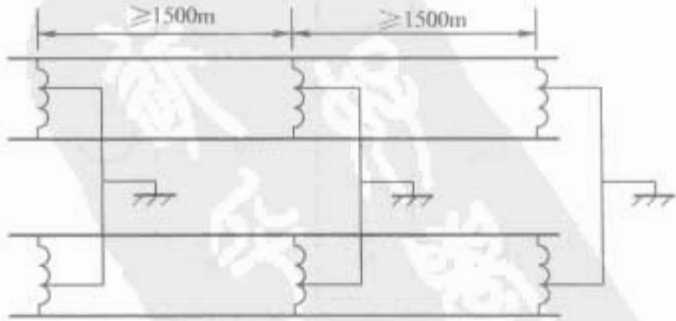


图 2.6-27 完全横向连接图

一台空扼流变压器完成,如图 2.6-28 所示。空扼流变压器的阻抗不得小于 17Ω(轨道电路载频下);新增空扼流变压器距机械或电气绝缘节距离大于或等于 50m,距离补偿电容大于或等于 10m;如果电气绝缘节间距超过 100m,则必须增加一台空扼流变压器完成横向连接。⑤在 3 条线路中,一条横向连接线禁止连接两段同一频率的轨道电路。该特殊

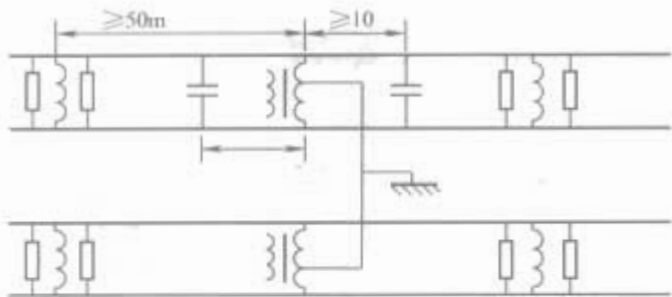


图 2.6-28 经扼流变压器的连接方式

情况亦可以通过载频类型合理设置加以避免，不再增加空扼流连接。⑥横向连接线材料为 70mm² 带绝缘护套的多股铜线，线长小于 105m。其连接位置分别为电气绝缘节终端连接空心线圈中心点、机械绝缘节终端连接扼流变压器中心点、区间线路增设的空扼流变压器中心点。⑦牵引电流回流连接如图 2.6-29 所示。钢轨牵引回流通通过附近的扼流变压器返回牵引变电所；利用空扼流变压器，其阻抗大于或等于 17Ω。如图 2.6-29 中箭头所示，连接线虽为两根分置，但仍可以视为横向连接线。空扼流设置地点距绝缘节长度不得小于 100m。⑧为满足钢轨纵向防雷需要，没有做横向连接的空心线圈，需要通过防雷元件连接。

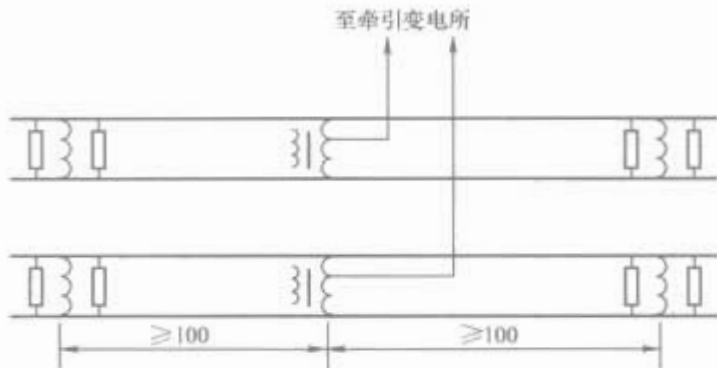


图 2.6-29 牵引电流回流连接

(4) 传输电缆的使用。

1) SPT-P 电缆。轨道电路研究同步开发了铁路内屏蔽数字信号电缆 SPT-P，实现 1MHz 模拟信号、2Mbit/s 数字信号，以及交流额定电压 750V 或直流 1100V 及以下铁路信号系统中有关设备和控制装置之间的控制信息及电能传输，可以在铁路电气化和非电气化区段使用。由于采用了内屏蔽层，减少了四芯组间的电缆串音，使用相同频率、相同电平等级的信号，可以在同一根电缆的不同四芯组内传输。

2) 使用原则包括：①两个频率相同的发送与接收不能采用同一根电缆；②两个频率相同发送不能设置在同一个屏蔽四线组内；③两个频率相同接收不能设置在同一个屏蔽四线组内；④当电缆中有两个及其以上的相同频率的发送或接收时，该电缆需采用内屏蔽型；⑤当电缆中各发送、各接收频率均不相同，可以采用非内屏蔽 SPT 电缆，但线对必须按四线组对角线成对使用。

以上 5 个原则可以简述为：同频的发送、接收线对不能同缆；同频线对不能同一个四线组；当无同频线对时，采用非屏蔽 SPT 电缆。

(5) 系统可靠性预计。根据目前对同类微电子设备使用初期故障率的统计，每段轨道电路发送故障率为 $\lambda_1 = 1.527 \times 10^{-4}$ 件/天；接收故障率为 $\lambda_2 = 1.498 \times 10^{-4}$ 件/天。

依以上基础数据，按发送 N+1、接收 0.5+0.5 方式将一个电务段管内轨道电路视为同一个系统，其可靠性预计见表 2.6-19。

表 2.6-19 电务段管内轨道电路可靠性预计

系统中含轨道电路区段数量	维修条件		系统无故障工作时间 MTBF (年)	一年内，系统影响行车故障件数 (件)
	有无值守人员	故障恢复时间 (T/h)		
200	无人	24	7.44	0.134
200	无人	12	14.88	0.07
200	有人	2	89.28	0.013
200	有人	1	178.56	0.006
200	有人站(占 50%)	1	13.16	0.08
	无人站(占 50%)	24		

注 $MTBF = K / [365 \times (C_{n+1}^2 \times \lambda_1^2 + \lambda_2^2) \times T]$
式中：n 为一个车站移频轨道电路总数，计算取值为 12；K 为系数，取值 0.12。

(6) “机车信号作为主要行车凭证”相关要求。当前，在评价轨道电路传输问题时，已不再局限于简单的调整、分路、机车信号入口电流几项传统要求。根据国外轨道电路现状及国内多年运用已经几度出现重大安全问题，如断轨检查，钢轨对地不平衡分路，轨道电路运用中接收器固有信干比等。

1) 机车信号作为主要行车凭证对轨道电路的关键要求。机车信号主体化能否实现的根本关键在于地面轨道电路自身的安全性和地—车信息传递的安全性及可靠性。

2) 轨道电路的安全性包括：①在满足调整及机车信号短路电流的条件下，有可靠分路保证；②在任意一点有“断轨”条件下，接收器可靠不工作，可以得到断轨检查；③在钢轨同侧接地故障条件下，满足列车 0.15Ω 分路，满足对断轨的检查。

3) 轨道电路的稳定性包括：①ZPW-2000 轨道电路在道碴电阻由 1~∞Ω·km 的条件下，均具有较稳定的特性阻抗，轨道电路受道碴电阻变化的影响较小；②DSP 技术的应用提高了轨道电路抗干扰水平，对轨道电路工作稳定性有利；③冗余系统的建立大大降低了电子设备故障影响行车的概率。

ZPW-2000 型无绝缘轨道电路是在法国 UM71 无绝缘轨道电路技术引进基础上，结合国情，进行提高系统安全性和系统传输性能的技术再开发。在轨道电路传输安全性方面，ZPW-2000 型无绝缘轨道电路已具备全程断轨检查、调谐区小于或等于 5m 的分路死区、调谐单元断线轨道电路隔离性能丧失的检查、拍频干扰防护、钢轨对地不平衡条件下的列车分路及断轨检查、约 5mW 的接收器端信号功率等涉及传输安全性的优良性能，适应机车信号作为主要行车凭证的需求。

机车信号相关内容见本篇第 3 章 8.1。

3.1.2 联锁系统

联锁是通过技术方法使信号、道岔和进路必须按照一定程序，并满足一定条件才能动作或建立的相互关系。

3.1.2.1 分类

联锁可分为非集中联锁和集中联锁。非集中联锁是指与联锁有关的道岔由道岔操作人员在其近旁进行操纵的联锁设备。集中联锁 (centralized interlocking) 是在信号楼内，信号值班员对道岔和信号机实行集中操纵的联锁设备。集中联锁又分为以下几类：

(1) 机械集中联锁。由人力集中操纵道岔和臂板信号机的联锁设备称机械集中联锁。典型的机械集中联锁为联锁箱联锁。

(2) 电气—机械集中联锁。通过人力集中操纵道岔，信号机由人工通过电气或机械操作，以机械方法限制操作对象变换位置或状态，以电气方法实现对象之间的联系的联锁为电气—机械集中联锁。典型的电气—机械集中联锁为电锁器联锁。

(3) 继电联锁。采用色灯信号机、动力转辙机和轨道电路等基础设备，并用继电器电路实现联锁关系的联锁设备称谓继电联锁，也称电气集中。继电联锁按站场规模及运用条件的不同，可分为大站、中站和小站继电联锁。我国推广的继电联锁为 6502 型电气集中，其特点是安全程度高，采用双按钮进路式选路法，进路实行自动分段解锁，调车中途折返能自动解锁。继电联锁设备由室内设备和室外设备两部分组成。室内设备主要有控制台、继电器组合及组合架、分线盘和电源屏等；室外设备主要有色灯信号机、电动转辙机、轨道电路及线缆等。

继电联锁作用原理是信号操纵人员经控制台办理列车、调车的进路或直接操作信号机和电动转辙机，通过连接通道将控制指令传送到继电器室内的继电器组合，继电器接收到指令后励磁或失磁到规定位置，将进路锁闭或解锁后，经连接通道控制相应信号机开放或关闭，实现进路、信号机及道岔的联锁。

(4) 计算机联锁即微机联锁或电子联锁。自 20 世纪 70 年代微型计算机问世后，以计算机的开关逻辑技术，取代电气集中联锁中的继电器电路获得成功，构成了计算机联锁。计算机联锁于 1978 年首先在瑞典哥德堡投入运用；我国最早自主研发的计算机联锁于 1983 年末投入使用，于 1989 年还投入使用驼峰调车场尾部计算机联锁系统。

3.1.2.2 我国主要的计算机联锁系统

我国联锁技术的发展基本上遵循独立自主研发、生产及结合我国轨道交通特殊的运用需求，走技术引进再创新的道路。我国自主研发的主要联锁系统主要包括 TYJL-Ⅱ型、DS6 型、JD-1A 型及 VPI 型等；采取硬件及系统引进、应用软件自主的方式推出了一批中外合作并符合国际通用三取二或二乘二取二结构的安全型计算机联锁系统，包括 TYJL-TR9 型系统、EI32-JD 型系统、VIP 型系统、DS6-K5B 型系统及 DS6-20 型计算机联锁。上述系统均以国铁运用为基础，兼顾城市轨道交通，并均取得了铁道部或地方部门的许可。

(1) TYJL-Ⅱ型计算机联锁系统。TYJL-Ⅱ型计算机联锁系统为我国车站计算机联锁 TYJL 系列中经典产品。

TYJL-Ⅱ型计算机联锁系统为分布式多微机系统，主要由以下 4 部分组成：控制监视机、联锁机、执表机和电务维修机。系统中所有的微机设备均为主、备双套，联锁机具有热备，自动切换功能，且均可由人工切换。各备用的微机同样构成系统与主机同步工作，备用系统还可以作为试验维修用。另外，设微机监测设备、应急操作台（含引导信号、道岔的操作及表示）、智能电源设备，上述设备配合接口柜、轨道柜和室外设备（信号机、道岔、轨道电路）完成信号系统的安全控制功能。其系统构成如图 2.6-30 所示。

TYJL-Ⅱ型计算机联锁系统结构主要配置如下：

1) 控制台。控制台采用单元控制台和鼠标操作控制台两种方式，显示器用 21 英寸 CRT 显示器。两种操作方式可

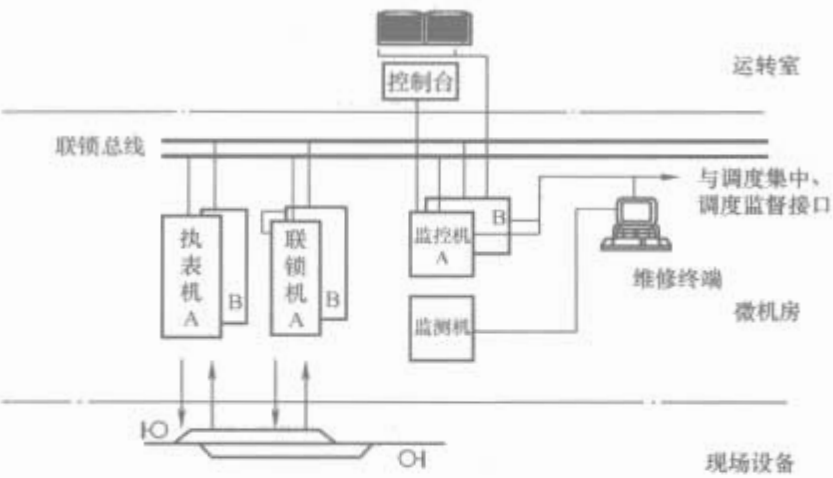


图 2.6-30 TYJL-Ⅱ型计算机联锁系统结构

以互切，提供设备与行车操作员的直接人机对话。

2) 监视控制机。监视控制机作为联锁系统的人机接口，接收行车操作员命令及提供图像显示；根据控制台发送的控制命令初选进路；与联锁机进行通信；构成局域网，与其他信息系统（如 ATS 系统）接口。

监视控制机的构成主要有主机板（Pentum Ⅱ CPU，主频为 266MHz，内存容量为 32MB）、语音板、通信卡等。

3) 联锁机和执表机。TYJL-Ⅱ联锁机（执表机）结构如图 2.6-31 所示。

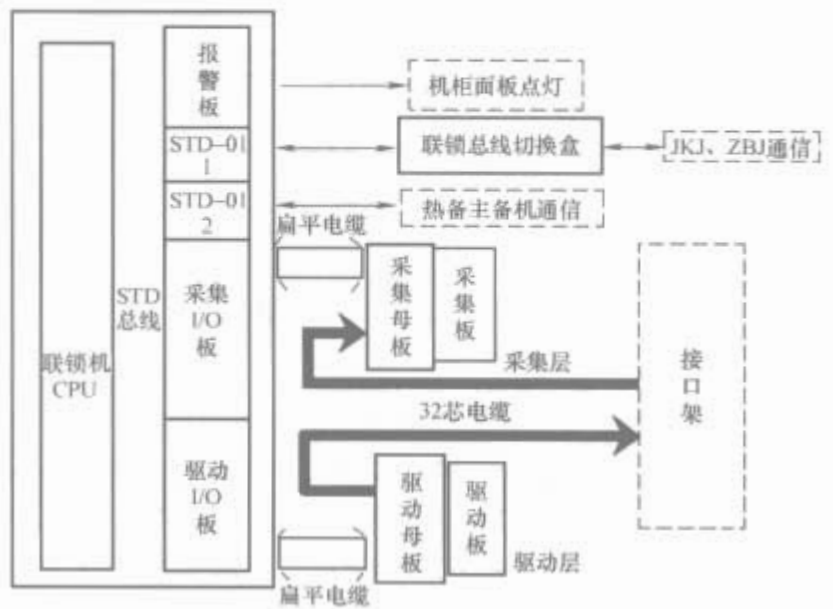


图 2.6-31 TYJL-Ⅱ型联锁机（执表机）结构图

联锁机和执表机采用 STD 总线，包括 386PC 板，1 个 RS232 串行通信接口、1 个 RS422 串行通信口，报警板，STD-01 通信板（联锁机插两块，一块用于主备机通信，另一块用于与控制监视机通信，执表机插一块），1604I/O 端口板。

4) 电务维修机。电务维修机主要包括主机板（Pentum Ⅱ CPU，主频为 266MHz，内存容量为 32MB）、通信卡、远程诊断接口。

5) 应急操作盘。当双套联锁设备均故障时，启用应急操作盘提供必要的应急操作，例如单操道岔、开放引导信号等。

6) 监测设备。信号设备的开关量监测由 TYJL-Ⅱ型计算机联锁系统实现；模拟量监测可由专用微机监测系统实现。监测设备构成包括综合采集模块、轨道采集模块、道岔采集模块和监测设备。其监测对象包括开关量及模拟量，其中，开关量主要包括基础信号设备的动作及表示及信号机主灯丝断丝报警等；模拟量主要包括电源设备的输入/输出电压，道岔转换过程中的转辙机动作和故障电流、动作时间、轨道电路受电端的电流和电压、发送端电压等。

7) 信息采集及控制驱动模块电路主要包括:

①信息采集电路。现场信息通过整形电路送入计算机。为了减少机柜内板间电缆,采集板采用母线工作方式,即各采集板连接至同一母线,微机通过 I/O 板为母线提供 5 个端口,共可选通 8 块采集板。从图 2.6-32 可知,CPU 只有收至脉冲信息时,方视为有效信号,电路为故障安全动态电路。电路中任何元器件故障均导致“0”或“1”的固定输出,软件判断固定的“1”“0”信息无效,该信息倒向安全侧。轨道继电器的安全侧信息为 GJ↓,即占用。GJ、ZCJ 等信息微机无法校核,且与联锁直接相关,对这些信息系统采集前后接点,程序软件对这些信息的前、后接点加以比较,若均为“1”或均为“0”,可断定电路某处发生了故障,该情况按落下接点信息处理,以保证安全。

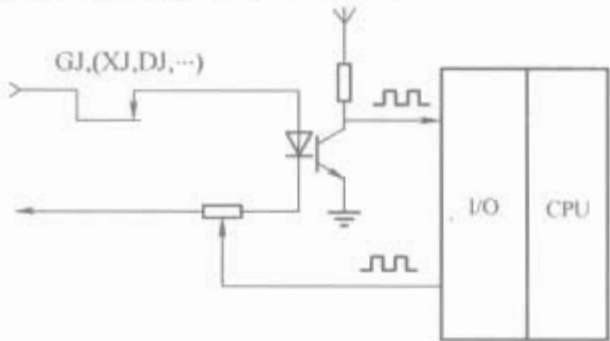


图 2.6-32 TYJL-II 型联锁信息采集电路的原理

②输出驱动电路。驱动板同样采用母线工作方式,I/O 板为驱动板母线提供 6 个端口,共可选通 8 块驱动板。图 2.6-33 所示为 TJYL-II 型联锁输出驱动电路的原理。

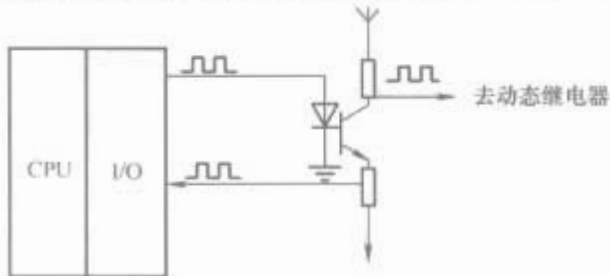


图 2.6-33 TJYL-II 型联锁输出驱动电路的原理

输出驱动板上接有 32 个发光二极管固定在驱动板的小面板上,如果有动态脉冲输出,则发光管闪烁;如果发光管灭灯或亮稳定,则灯光均表示无动态命令输出。

③动态驱动设备。动态驱动设备是指直接参与控制室外信号机和电动转辙机的控制设备,目前仍采用继电器进行控制,价格低廉,并安全可靠。为保证计算机联锁系统的安全输出,采用双输入动态驱动单元+偏极继电器。该继电器由安全型偏极继电器、固态继电器、电阻电容元件构成,为故障—安全型动态继电器。图 2.6-34 所示为 TJYL-II 型联锁动态驱动原理示意图。

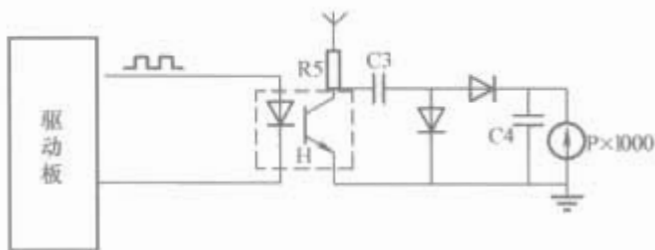


图 2.6-34 TJYL-II 型联锁动态驱动原理示意图

当无控制信号输入时,电路处于静止状态,固态继电器 H 截止,电容 C3 两端电压等于局部电源电压,电路中无电

流流通,动态继电器处于落下状态。当有控制脉冲输入时,控制脉冲高电平使固态继电器 H 导通,电容 C3 经 H 向 C4 充电,当控制脉冲由高变低,H 截止时,电源经 R5、D2 向 C3 充电,经 2~3 个脉冲,使 C4 的电位充至偏极继电器的吸起电压,偏极继电器励磁吸起。

每个驱动单元均有两组输入,分别接联锁 A 机、联锁 B 机输出的脉冲控制命令,其驱动回线分别受切换继电器控制;同时,动态继电器局部电源 DKZ、DKF 的极性也因受切换继电器控制而变更。上述条件确定了动态继电器受 A 机还是受 B 机控制。

8) 安全信息通道。联锁机和执表机之间采用串行 RS485 接口,机间通信采用半双工同步通信方式,对此通道要求安全可靠。除采用同步通信中的 CRC 校验外,对传输的信息码采用特殊的编码和重复发送等冗余技术,确保信道的安全可靠。

联锁机的前面板上有 4 组通信接发灯,用来指示系统内各部分的通信状况,其中第 1 组指示联锁机与监控机的通信;第 2、3 组指示联锁机与执表机的通信,第 4 组指示两套热备的联锁机之间的通信。

(2) 主要功能。

1) 联锁机的主要功能。联锁机的主要功能:①实现与上位机和执表机的通信调度。采用循环呼叫应答方式,如果通信不通,则超时报警及退出,接着呼叫下一个设备。在联机状态,联锁机备机定时呼叫主机进行信息交换和信息比较。②实现信号设备的联锁逻辑处理功能,完成进路确定、锁闭,发出开放信号和动作道岔的控制命令。③采集现场信号设备状态,如轨道状态、道岔表示状态、信号机状态等。④输出动态控制命令,通过动态板驱动偏极继电器控制动作现场设备。

2) 执表机的主要功能。执表机的主要功能:①接收联锁机发出的执行命令和向联锁机发送采集信息;②其他可参见联锁机功能。

3) 电务维修机功能。为方便电务维修人员维护计算机联锁,系统中增加了电务维修机(维修机)。维修机通过与主备监控机连接,将联锁系统中的实时信息采集至维修机,并记录。

(3) 软件。计算机联锁系统软件按系统硬件的结构划分为 3 个软件包:人机对话处理软件包、联锁逻辑处理软件包和执行表示软件包。软件包之间由专用通信软件沟通。

人机对话处理软件包不涉及行车安全,主要包括按钮命令处理和进路初选软件,图像显示软件和记录、储存、打印软件。

为提高联锁软件的可靠性和故障安全性,系统采用双套联锁软件,在控制命令输出级进行比较。若命令一致,即向外发出驱动命令。A、B 双套软件从数据结构至程序流程均不相同,可保证在机器码级的数据完全不同。

1) 联锁软件。联锁程序采用冗余编码方式,以减少形成危险错误的可能性。联锁数据模块采用站场图形数据结构连接构成,程序采用分层管理:①总体调度。负责通信管理、联锁运算、命令传递、部分校验查错及其他辅助程序的协调管理。②联锁处理。进行联锁运算。③输入、输出通道。相对于联锁处理而言,一切与输入采集有关的程序和数据均视为输入通道,与输出控制有关的程序和数据均视为输出通道。

2) 双站场形网络的数据结构。数据的站场形网络结构是指描述站场固有特性的固化数据的结构与站场几何图形的

对应，即现场的每一个信号、道岔、区段和超限绝缘在程序固化数据区中均有其对应的固化数据模块。相邻的模块通过数据指针相互链接，其链接关系对应于 6502 定型组合的网络结构。网络中的模块主要有道岔、信号、区段和超限绝缘 4 类。

3) 逐层递进校核的程序结构。采用此种数据和程序结构可免去将站场联锁表转换为计算机内的联锁检查表这一烦琐而又易遗漏和出错的工作。所有联锁关系的检查均可固化在程序模块中，不会因站场的不同而不同。

该结构使程序层次清晰。程序模块根据层次的不同，判断上述其他模块的状态，减少了模块间相互查找和信息传递，提高了程序模块的独立性。由于联锁检查的多层次，所以它具有较好的安全性。

4) 安全侧信息冗余编码和双校验以及输出控制的完全动态。联锁运算的可靠性与故障—安全性的前提是信息采集及其处理的正确性与故障—安全性。从软件的角度看，输入通道除应具有高可靠性外，还应保证由于软件或硬件的故障而使输入信息缓冲区遭至破坏时实现安全处理。为防止数据错误可能造成的危险，联锁程序通常采用冗余编码的方式。

计算机输出控制由输出程序根据控制运算的结果产生控制信息的输出。在实现联锁机的硬件输出控制电路所要求的输出控制信息动态化的前提下，也实现了计算机内部所有输出控制数据的完全动态化。即当有控制输出时，不是对控制对象产生固定的控制数据，经动态处理转化为动态控制信息输出，而是根据控制对象运算动态控制数据经输出程序输出。计算机内部任何一个固定数据均不能产生动态输出控制信息，只有当控制数据按规定格式不断往复变化时，才产生相应的控制输出。

(4) 我国的计算机联锁。将我国研发的主要计算机联锁系统的概要列于表 2.6-20。

表 2.6-20 我国研发的主要计算机联锁系统的概要

计算机联锁形式	联锁设备主要说明
TYJL-II 型	为分布式多微机系统，是 TYJL 系列的基础产品，曾获铁道部科技进步一等奖。系统主要由监控机、控制台、联锁机、执行表示机、继电接口电路、电务维修机、电源屏和室外设备组成，其中监控机、联锁机、执表机均为双套，具有热备、自动切换功能。各备用计算机构成系统与主机同步工作，备用系统可脱机用于试验维修
TYJL-TR9 型	(1) 系统由操作显示机、监视控制机、容错联锁机和维修机组成。除联锁主机外，其余部分的结构和功能与 TYJL-II 型计算机联锁控制系统相同 (2) 该系统采用 TRICON 工业用控制容错计算机。该产品通过了 TUV 关于 IEC 安全标准的认证 (3) 容错计算机分两类机箱，即主机箱和扩展机箱。系统最多可以接受一个主机箱和 14 个扩展机箱。容错计算机内部有 3 个独立的系统，每个 I/O 模块具有两个独立的电路。这两个独立的电路各自完成采集任务，通过 3 个独立的 I/O 总线传给相应的主处理器。主处理器间对输入数据进行比较、表决后，执行联锁运算。计算结果传给输出模块，经表决后控制室外设备 (4) 联锁逻辑软件采用模块化。软件数据结构与站场图形相适应，每组道岔、信号机、轨道电路均有相应的数据模块，相邻模块通过上下链表连接，站场不同则数据不同，但程序相同 (5) 所有 I/O 模块支持热备功能。当主模块故障时，系统可自动切换至热备模块，保证系统不间断工作

续表

计算机联锁形式	联锁设备主要说明
TYJL-TR2000 型	(1) 该系统是建立在完全硬件冗余基础上的计算机联锁系统，由联锁机、监控机、车务控制台、电务维修机和微机监测系统 5 部分构成 (2) 联锁机采用三取二的冗余结构，由 3 套完全相同结构的嵌入式微机组成，具有三重冗余的联锁控制模块、联锁控制总线、智能采集驱动模块 (3) 监控机由两套互为备用的工业控制机组成，主要完成人机接口功能，并通过局域网与联锁机通信 (4) 控制台具有光带按钮控制台、监视器式按钮控制台、数字化仪控制台和鼠标控制台等多种可选方式，提供不同的操作手段和站场状态显示方式 (5) 电务维修机由一台工业控制机组成，完成与监控机的通信，记录系统的运行状态、故障状态、操作命令，以及记录的再现、打印等功能。同时，还可以通过拨号上网，实时传送站场状态和记录信息，实现远程诊断功能 (6) 按功能划分，系统可分为两部分，即安全控制区域和非安全控制区域。安全控制区域包括联锁逻辑控制层、执行控制层和联锁安全总线；非安全控制区域主要包括本地操作表示层和车站控制局域网
TYJL-ECC 型	该联锁为三取二容错计算机联锁控制系统，采用国外铁路信号控制专用的故障—安全计算机和操作系统。该系统全面遵从欧洲电子技术标准化委员会的标准，并通过了最高级别 SIL4 级的安全认证，具有强大的信息处理能力和接口能力，在功能和规模上均可灵活配置，能适应各种规模的站场 TYJL-ECC 可以连接数个联锁计算机。联锁计算机可以集中设置在控制中心或分散置于较远的地点，即可实现集中控制。分散控制系统采用元件控制计算机 ECC，可有效地实现系统再配置，满足不同线路的运行需求 系统可适应传统的标准轨旁列车控制设备，以及基于通信的列控系统 CBTC 的需求
JD-1A 型	(1) 系统的关键部分均采用双套热备，保证设备故障不间断使用。联锁网采用双网并联运行方式，网际切换便捷，可实现 0 延迟网切换。上层结构由通用计算机局域网构成另一个封闭的子系统（监控网） (2) 系统保留了 6502 电气集中的执行电路，包括道岔启动电路、信号机点灯电路、轨道电路、联系电路等成熟的继电电路，其他电路由计算机系统替代 (3) 联锁软件模块、输入—输出模块均为双套程序。各程序使用完全独立的数据、双套软件，采用开放式的软件输出技术、输出清零技术、多种自检算法及工程化的软件开发方法 (4) 支持车站值班员利用鼠标、数字化仪、控制台作联锁设备，用 CRT、LCD、等离子等各种显示器作为显示界面，支持单或多显示屏，以及单人、双人、多人等各种操作模式 (5) 系统配置了电务维修计算机，可实时监视车站信号设备及联锁系统的运行，记录车站值班人员的操作、车站信号设备运行，包括列车/车列走行过程的实时监督和记录及联锁系统故障等内容。电务维修机具有远程诊断功能，通过调制解调器和电话线路，可将联锁系统的信息调往维修中心，实现远程监测和诊断
EI32-JD 型	(1) 系统采用 EI-32 型计算机联锁主机，结合 JD-1A 型计算机联锁的软件开发研制而成的联锁系统 (2) 系统由双机热备操作表示机、二乘二取二联锁机、二重二取二驱动采集机构成硬件冗余系统，其中联锁机采用 EI-32 型专用计算机及系统软件 (3) 该系统具有良好的性能、运行稳定可靠及高安全性，可实现联锁系统的在线与离线的同时运用

续表

计算机联锁形式	联锁设备主要说明
VPI 型	<p>(1) 系统采用国外专利技术, 结合我国铁路运营技术条件, 经二次开发, 形成以 VPI 专用联锁机为基础的、多处理器安全型车站联锁系统</p> <p>(2) 系统是以数字集成安全保证逻辑 (NISAL-numerically integrated safety assurance logic) 为基础, 采用故障—安全设计的微机处理器系统。综合运用了“组合故障—安全”、“反应故障—安全”和“固有故障—安全”技术</p> <p>(3) 系统逻辑电路由安全型逻辑和非安全型逻辑组成, 可将传统的由继电器实现的联锁逻辑写成一系列逻辑表达式 (即布尔表达式), 通过数字集成安全保证逻辑 NISAL, 确保联锁逻辑按要求执行。NISAL 是一种安全型逻辑, 运行于联锁逻辑以外, 提供了独立校核模式。VPI 符合美国铁路协会 (AAR) 标准</p> <p>(4) 系统配备系统维护台, 信号维护人员可在线测试系统状态, 实现故障再现, 向操作员提示故障原因, 提出处理建议, 并可查询联锁运算参数。VPI 自诊断功能可故障定位到板级, 输入、输出板故障定位到端口。远程诊断接口可接至用户主管单位及 VPI 专用网管中心</p>
DS6-11 型	<p>(1) 系统采用动态冗余的双机热备结构, 具有故障自动切换和人工切换功能</p> <p>(2) 联锁软件采用双份编码, 模块化和结构化设计, 程序设计标准化; 安全输出采用动态驱动方式, 表示信息输入采用动态编码方式。控显子系统采用双机热备结构, 通过控显机转换箱, 实现人工/自动切换。当设备故障时, 可自动切换</p> <p>(3) 系统人机界面具有多种可选操作方法和表示方式。操作方法可选按钮盘、数字化仪或鼠标。站场表示设备可选图形显示器或光带表示盘等多种方式</p> <p>(4) 该系统具有自检测和故障诊断功能, 并可提供远程监视, 为设备维护提供技术支持。系统具有与其他信息系统联网交换信息的能力</p>
DS6-20 型	<p>(1) 系统为具有三重冗余 (三取二) 结构的计算机联锁系统。系统联锁子系统和输入输出接口, 采用具有容错和故障—安全性能的 GMR (Genius Modular Redundancy) 系统。该系统适用于高可靠性和高安全性要求的实时控制系统</p> <p>(2) 系统联锁软件全部由 DS6-11 系统移植。该系统是已成熟运用的软件与引进的国外高性能硬件相结合的产品</p>
DS6-K5B 型	<p>(1) DS6-K5B 系统联锁软件在我国成熟软件基础上, 结合国外技术构成的</p> <p>(2) 该系统的安全层硬件采用国外技术, 具有故障—安全性能的联锁计算机和电子终端。联锁计算机和电子终端均为二重系。每一系为具有故障—安全的双 CPU 系统, 构成二取二结构</p> <p>(3) 系统的二重系同步工作, 一系故障自动退出, 另一系自动接替工作。每一系的双 CPU 共用时钟发生器, 比较 CPU 数据总线上的信号。当比较结果不一致时, 输出导向安全侧</p> <p>(4) 系统内各微机之间的通信全部经光缆连接, 具有区域联锁功能, 控制范围从几公里到几百公里的车站</p> <p>(5) DS6-K5B 系统联锁软件通过铁道部计算机联锁检测中心的检测, 同时通过铁道部电磁兼容及防雷测试, 并获得铁道部颁发的计算机联锁生产许可证</p>
DT-1 型	<p>(1) 系统是以适应城市轨道交通车站站场简单, 宜采用区域联锁控制及实现联锁与 ATP 地面设备一体化为目标</p> <p>(2) 系统采用三取二冗余结构, 每周进行三机同步校核。输入、输出采用热备工作方式, 实现故障无扰切换。输出控制具有防混线功能, 采用双断和回读、8 位编码技术等冗余技术</p> <p>(3) 系统网络和联锁总线均采用双网结构, 网络信息冗余编码, 在三取二硬件平台中, 联锁机和 I/O 模块之间采用串行现场总线连接, 选用控制局域网络 CAN (Control Area Network) 作为控制网络</p> <p>(4) 系统集成了独立于联锁的列控地面系统, 其 ATP 发码设备依据列控控制信息, 产生轨道速度编码低频调制信号, 直接输出至轨道电路发送器</p> <p>(5) 联锁逻辑运算集中在设备中心站完成, 远端站不设联锁机。中心站与远端站之间通过光缆通道连接, 采用安全传输控制技术, 构成了区域型计算机联锁系统</p> <p>(6) 自动监测、记录全线内设备的运用情况, 可迅速完成故障定位</p>

3.1.3 行车指挥系统

行车指挥系统是行车调度人员或车站值班人员对其所辖范围内区段、车站道岔和信号状态实施监控, 并指挥列车运行的设备, 包括调度监督和调度集中。调度集中既是信号设备也是行车管理系统, 而调度监督设备对列车运行只监不控。本部分只阐述有关调度集中的内容。

(1) CTC 是铁路行车指挥和控制设备。行车调度员在调度所内, 通过调度集中监视其管辖区段内的列车运行, 控制车站的列车进路和信号, 达到直接、迅速地贯彻调度员意图, 执行列车运行计划的目的。

(2) 行车调度控制系统 (dispatching traffic control system)。是在调度集中的基础上, 利用自动控制、远程控制和信息技术, 对一定地域范围内运行的全部列车进行集中监视和实时控制的设备。行车调度员可以在一个地点, 对所管辖地区的单线和多线区段或枢纽、地区线路上运行的列车集中调度。

根据传统定义, CTC 是以人工控制为主体的系统。随着技术的发展, 我国铁路采用的 CTC 系统也逐渐具有自动控制及运行调整功能, 仍然称作 CTC。

在城市轨道交通信号系统中, 将具有自动控制为主体的行车调度系统称为列车自动监控系统 ATS。ATS 部分可参见城市轨道交通的信号系统。

3.1.3.1 系统构成模式

根据系统构成和功能执行模式, 系统可主要分为中央集中管理集中控制型、中央管理车站控制型及分散自律控制型等 3 种方式。

(1) 中央集中管理、集中控制型。CTC 系统控制计算机设在中心, 通过控制中心系统完成运行图的管理、追踪, 进路控制命令的输出、报表统计等主要功能。CTC/ATS 车站设备主要执行控制中心进路控制命令及表示信息的回送。控制中心系统与站、段分机以并联双工信道相连。该类技术成熟, 造价相对低廉; 其缺点是中央控制计算机、传输设备或信道发生故障, 将影响全线列车运行, 对中心计算机处理速度、容量、通道传输、系统冗余度要求较高; 现场功能、设备较简单。

(2) 中央集中管理、车站分散控制型。系统主控制计算机设在中心, 中心计算机与各车站智能终端信道多以点到点方式相连, 车站与车站间设有迂回信道。中心计算机监视和管理运行图, 车站智能终端依据由中心计算机下载的运行图完成行车指挥控制功能。当列车运行偏离运行计划需要中心调整时, 可由中心计算机或人工介入控制, 也可将调整计划下载至车站设备。在中心计算机发生故障的情况下, 车站计算机仍能按列车运行图计划完成行车控制。该种控制方式相对灵活、可靠、技术成熟, 对中央计算机的要求低于集中方式, 对车站设备要求相对较高。

(3) 分散自律控制型 (简称 ADS, autonomous decentralized system)。ADS 技术随计算机网络技术发展和光纤通信技术的发展而诞生, 其最大特点是: 系统的中心计算机和车站计算机处于同等地位, 它们可在同一模式下各自独立运行, 并协调监控全线列车。中心或车站系统故障除对辖区可能造成影响外, 一般不会将故障范围扩大。通常中心和车站单元均接入环形主干网。系统具有高可靠性和扩展性, 以及较好的实时性。

3.1.3.2 主要的 CTC 系统

我国已投入运用、基于计算机的 CTC 主要包括以下系统:

(1) D5 型 CTC 系统。D5 型 CTC 系统是国家重大技术装备科技攻关项目,是为大秦铁路研制的设备。该设备采用国外引进的工业单板机和国内研制的通道、电气集中接口设备及全部软件组成,系统包括 1 套总机、28 套分机,全线长 613.5 km,于 1993 年底投入运行。

该系统采用控制随时起动、表示循环扫描的工作方式。调度员可随时操作键盘,将控制意图存储在系统中,按程序向车站发送控制命令;车站表示信息,按循环扫描方式逐一检查表示对象的状态。为缩短循环扫描周期,对象状态有变化的表示信息被优先发送。对于出现差错的信息组,总机可重复呼叫;分机具有信息重发功能。总、分机间通信采用半双工方式。

1) 系统组成。该系统包括调度所设大型单元拼装式表示盘,车站站场细景彩色显示器多台,进路控制显示终端 1 台,车次号输入显示终端 1 台,列车运行实绩及计划运行图显示器 1 台及监视运行图执行状况和修改运行计划的数字化仪 1 台,描绘仪 1 台,打印机 1 台;调度所 CTC 设备室内设有 CTC 总机 1 套,复示车站信号设备状况的彩色显示器 1 台,监视系统工作状态的显示终端 1 台。车站继电器室设有 CTC 分机,车站值班员室设显示终端 1 台,各自动闭塞分区信号点设有监视该点工作状态的设,以专用线路与车站 CTC 分机连接,有关数据由分机转发至调度所。

2) 主要技术指标。该系统基本参数有基本容量为 20 座车站/系统,80~120 个二位式控制对象/站,256~512 个二位式表示对象/站,并且系统控制的车站数、每座车站的控制和表示的对象数可灵活增减;数据传输率为 1200bit/s;当无中继时,控制距离不小于 50km。通道为 2 线制或 4 线制传输;传输线路可采用电缆、光缆及其他通信线路,并可利用载波进行远距离传输;线路信号电平符合路传输的通信电平标准;信道编码保证码距 $d \geq 4$;具有迂回线路;输出控制命令的接口电路满足信号安全型继电器励磁的时间和电功率要求;区间信号点可以有 6 个表示信息。

(2) D6 型 CTC 系统。D6 型 CTC 系统是为秦沈客运专线研制的设备,调度所设在沈阳。秦沈客运专线为双线双方向运行的电气化铁路,线路长约 400 km,包括 6 座车站。

1) 系统功能。该系统具有列车运行图管理、列车调整、列车进路控制、列车运行追踪、自动报点、重叠信息显示等功能;并且具有向调度指挥管理信息系统(DMIS)和旅客服务系统提供信息、设备集中管理监控与维护,以及统计、资料管理、人员培训等功能。

2) 系统组成。调度所设有数据库服务器、通信服务器、计划员台、调度员台、控制台、显示台、电务维护台、网络维护台等。各设备之间通过交换机组成调度所局域网实现内部数据交换,通过路由器与车站分机或其他区段的调度监督或调度集中系统实现远程信息交换和共享。数据传输通道为数字星型双通道结构,设 22 个无人中继站,数据传输率为 64kbit/s。在车站,将计算机联锁的控制台和上位机纳入调度集中分机。车站信号系统由计算机联锁、列车运行控制、调度集中分机、信号局域网、信号微机监测等子系统组成。

(3) 兰新铁路柳园—哈密双线区段分散自律式调度集中。

1) 系统组成及功能。该包括:

①总机。两台基本级中央计算机采用 486 微机,构成双机热备的基本级系统的中心环节,处理 CAD(computer aided dispatch 计算机辅助调度)级中央计算机、调度集中总

机、显示屏、操作员台、调度员台、基本级维护台的各种信息,完成基本级系统的全部功能。CAD 系统不属于基本配置,根据用户的需要来选择;互为热备用的两台 VAX310HD 计算机是 CAD 级系统的中心环节,处理基本级中央计算机、各调度员台、CAD 级程序员的各处信息,完成计算机辅助调度级的全部功能。

②1 个基本级维护台,供维护基本级系统用。可调阅各站站场显示、基本级各设备的工作状态、各站输入码位状态、记录基本级系统各种操作命令的执行时间及基本级系统、各站电气集中、自动闭塞信号设备各种告警的发生和复原时间等运行信息。该台保留 24~48h 的运行信息,并可拷贝软盘或由打印机输出。

③计算机辅助调度级程序员台供维护 CAD 级系统用,可以图形或表格方式调看各调度台的基本计划、班计划、阶段计划和实绩运行图,也可调阅保存 24~48h 的各种运行图,信息可拷贝软盘或由打印机以表格方式输出。

④1 台调度集中总机,实现与分机设备及主机的连接,进行数据通信;1 台转换屏供两路电源的切换。1 台防雷屏实现对电源及通信线路的防雷;由 1 台调压屏引入的两路电源,经电源转换屏后送入调压屏调压,以保证系统电源在所要求的波动范围之内。1 台 UPS 保证短时间断电时系统不中断工作,保护计算机设备不受损坏;1 套监视终端方便维护人员监督系统的显示。

⑤调度所设备包括每个调度台设有 1 套显示屏设备,1 套操作员设备,1 套调度员设备;显示屏设备主要由大屏幕彩色显示器、显示屏架及数台微机组成,微机通过多屏显示卡(DUAL-VGA 卡)驱动彩色显示器,其数量与彩色显示器的数量相关;操作员台设备由 1 台彩色显示器、1 台微机、1 个鼠标器组成;调度员台设备由两台彩色显示器、1 台微机、1 台彩色打印机,1 个鼠标器组成,其中一台显示器显示站场图,另一台显示列车实绩运行图或日班/阶段计划运行图,彩色打印机完成绘制运行图功能和打印列车统计报表功能;当系统给远距离显示终端发送显示或与其他系统通信时,总机房内设置的一台通信前置机,负责将显示送给站调、局调、电务调度等,或与其他系统接口进行数据传输;根据需要可以设置站调、局调、计划台、货调台、机调台、调度长台、值班主任台、电务调度等显示终端。

⑥车站设备包括车站设 1 台分机,每台分机由多功能处理板(G88 板)、数据采集板(DIB 板)、控制命令输出板(DOR 板)、电源板(PWS 板),以及机箱、机架、防雷组合等器件组成;在系统的入口端站或编组站,或区段站还设有车次号输入装置,由车站值班员输入列车车次号;G88 板采用 8088CPU,板上配有调制解调器,并有若干可选配的 RS422/RS232 串行接口;DIB 板采用 80C31CPU,每块 DIH 板具有 64 位全隔离的输入电路。

2) 主要技术指标。电源电压为 220V;系统平均无故障工作时间为 $MTBF \geq 2000h$;通信方式为四线全双工,迂回通道;数据传输速率为 1200bit/s;传输频率为 300~3400Hz;调制解调为移频键控(FSK),符合 CCITT V.23;发送电平为 -15~0dB 连续可调;接收电平大于 -25dB;线路信噪比大于 25dB;误码率小于 10^{-7} ;中继方式为再生中继。

总、分机之间通信采用 CRC16 多项式循环冗余校验,总机对各分机采用逐站查询方式。查询某分机时,如果有控制命令,则将其发给该分机,分机将本站表示信息的变化按

其先后次序发给总机。通信中断后的第一次查询,总机均查询全部表示信息的状态,并储存于总机内,根据查询收到的变化信息不断更新。每查询 256 次,总机仍要查询全部表示信息状态,并将收到的信息与总机内存储的信息进行核对。总机查询分机的周期一般小于 3s,视区段内车站的数量而定。

系统采用 CRC16 循环冗余校验、信息序号检查、信息变化按序发送,以及隔时全查校验等技术,保证信息传输的可靠性。

每个调度区段第一个车站的分机通过载波通道或实回线与总机连接,第一个分机与其他分机之间通过实回线连接。而末端站的分机通过载波通道或实回线,也与总机连接,构成一个闭环的信息传输通道。一般将总机与第一号分机连接的方向定义为主用通道方向,总机与区段内末端分机连接的方向为迂回通道方向。

通道正常时,总机以主用通道方向呼叫所有分机,建立总、分机间的通信传输,并且每隔一定呼叫次数后,通过迂回通道反方向呼叫所有分机,检查迂回通道通信状态。

当某两站间通信线路发生故障时,总机在主用通道方向呼叫某分机失败(呼叫 3 次无应答)后,总机通过迂回通道反方向呼叫该分机。如果反方向呼叫成功,则在该方向上同分机保持通信;如果反方向呼叫亦失败,将判该分机死机。不管总机是采取主用通道方向还是迂回通道方向与分机通信,在一定次数之后,均将反方向呼叫分机,以确定通道状况。如果发现主用通道恢复,将立即恢复主用通道,分机故障后总机仍将隔一定时间轮流从主用、迂回通道方向呼叫该分机,直至总机与该分机间通信正常。分机处于反方向通道工作或故障,系统在显示屏及基本级维护台上给出告警显示。

3.1.3.3 分散自律式调度集中

分散自律调度集中系统不同于传统 CTC 系统的集中控制,而具有分布式控制功能。分散自律调度集中系统综合了计算机技术、网络通信技术和现代控制技术,采用智能化分散自律原则,以列车运行调整计划控制为中心,兼顾列车与调车作业的高度自动化的调度指挥系统。分散自律式 CTC 将列车运行调整计划下传到各个车站自律机中自主自动执行;在列车运行调整计划的基础上,解决列车作业与调车作业在时间和空间上的冲突,实现列车和调车作业的统一控制。该系统最突出的特点是将系统的目标和任务按一定方式预先分配给子系统,由子系统间通过数据通信进行信息交换和相互协调,独立完成目标或任务。

分散自律 CTC 具备了调车进路远程控制和智能化控制的功能,有效地解决了车站与调度中心频繁交换控制权进行调车控制的问题,适合我国铁路客货列车混跑、调车作业量大的运输特点。

(1) 基本功能。系统的总体功能为中心实现运行计划管理,车站完成进路自动控制。车站根据计划生成进路命令,交由联锁系统排列进路;进路控制以列车计划为主、调车作业为辅,在保证列车计划顺利执行的前提下,实现对调车作业的约束管理。同时,系统具备调度中心、车站人工直接控制的能力,以及 DMIS 的全部功能。铁路分散自律式 CTC 应具备以下基本功能:

1) 实时监视站场信号设备和列车运行状态,实现站间和区段透明显示。

2) 追踪列车运行位置和到发时刻,自动描绘列车实迹运行图,追踪列车编组状态。

3) 利用计算机辅助编制和调整列车运行计划,实现调度指挥计算机化。

4) 通过系统网络向车站下达计划和调度命令。

5) 通过系统网络和无线通信向机车下达调度命令、调车作业单、行车凭证和进路预报等信息,自动编制车站行车日志,生成运输统计报表,实现维修作业的综合管理和远程登、销记。

6) 遥控所有联锁设备按钮,具备列车、调车和非正常作业人工遥控功能,按照列车运行计划和车站站细,由自律机自动自主控制列车进路。

7) 按照调车作业计划,由自律机根据机车请求和列车运行状况自动自主控制调车进路,并对调车状况进行监控和报警。

8) 具有完备的网络安全防护功能,实现 TMIS 和 DMIS 的结合和信息交换。

(2) 系统总体构成。分散自律 CTC 由调度中心子系统、车站子系统、调度中心与车站及车站与车站之间的网络子系统 3 部分组成。调度中心子系统安装在控制中心调度楼内包括中心机房设备和调度所设备。中心机房设备包括数据库服务器、应用服务器、通信服务器、网络设备、电源设备、防雷设备、网管工作站、系统维护工作站等。调度所设备包括调度员工作站、助理调度员工作站、值班主任工作站、控制工作站、计划员工作站、表示屏、综合维修工作站等。中心采用高性能的交换机组成双 100Mbit/s 以太网,各设备通过双网卡与双局域网连接。

车站子系统安装于 CTC 所辖车站,主要设备包括车站自律机、车务终端、综合维修终端、电务维护终端、网络设备、电源设备、防雷设备、联锁系统接口设备和无线系统接口设备等。车站用高性能的交换机组成双 100MMbit/s 以太网,车站设备通过双网卡与双局域网连接。

网络子系统由网络通信设备和传输通道构成。中心到车站、车站之间通过高性能的路由器组成双环路的 2MMbit/s 广域网,保证高速可靠的数据传输,防止单环故障造成的通信中断。

图 2.6-35 所示为采用专用数字通道构成双重 IP 广域网连接的 CTC 系统配置,其典型配置包括中心子系统和车站子系统,中心子系统含 1 套中心机房设备和 1 套调度台设备,调度台数量按控制中心实际需求设置。

调度中心子系统设备分为中心机房设备和调度所设备。

1) 中心机房设备包括:①数据库服务器。采用高性能小型机服务器作为主机,配备磁盘阵列,用于存储各种数据和操作记录。其具体配置采用了两套高性能 64 位小型机服务器,配置磁盘阵列,操作系统为 AIX,数据库为 Oracle。两套主机设置相同,一台运行,另一台处于热备状态;当一台故障时,可无缝切换到另一台。②应用服务器。采用高性能 PC 级服务器作为主机,操作系统为 LINUX。应用服务器为主备方式运行,两套主机设置完全相同。当主机运行时,主动与系统中各部件建立通信连接进入工作状态。备机处于热备状态,实时接收主机发送的同步信息,一旦同步信息中断,立即成为主机,接管原主机的工作。应用服务器用于运行图的自动调整和数据存储与数据交换,负责向所有应用工作站提供行车表示信息、列车编组信息、车次号跟踪信息、列车报点信息等,并保存到数据库服务器。应用服务器配置 3 块网卡,分别与两台网络交换机相连,另一块用于两台服务器信息交换。③通信服务器。采用两套高性能 PC 级服务器作为主机,操作系统为 LINUX。它用于调度中心与

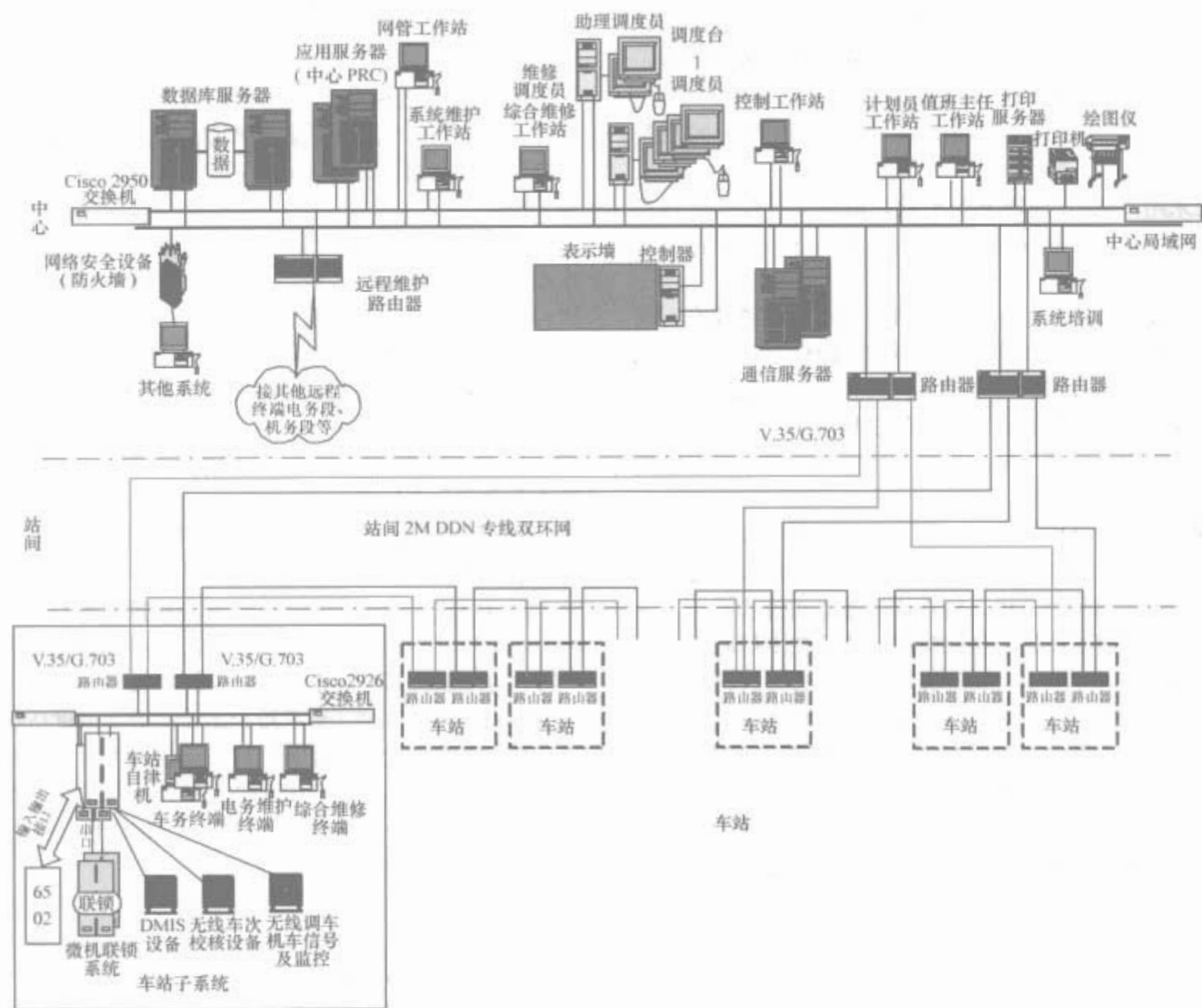


图 2.6-35 采用专用数字通道构成双重 IP 广域网连接的 CTC 系统配置

车站子系统之间的信息交换，如运行图数据、调度命令数据、进路操作数据、站场显示数据、日班计划数据、运统 2/3 数据等在中心子系统与车站子系统之间的交换。④网管工作站。采用高性能 PC 工作站，操作系统为 Windows 网络管理软件，具有诊断报警功能，可提供网络拓扑图状态、通道的信息流量和网络连接等信息。⑤系统维护工作站。采用高性能 PC 工作站，操作系统为 Windows。主要用于系统设置、调试和技术支持；授权后，具有远程维护与技术支持功能。同时具有监视系统的运行状况的功能，对系统、现场设备运用情况、操作命令、报警信息进行记录、分析、回放、输出和打印，运行信息的记录保存 30 天以上，如站场显示与再现、运行图浏览、进路操作的再现、系统运行状况监视、远程维护支持等。⑥网络设备。网络子系统设计为双环自愈方式；控制中心计算机设备之间的通信采用双局域网的方式，在中心机房设置两套网络交换机。系统交换机为 48 口以上的交换机，配置多台连接车站的路由器，路由器配备足够数量的 2MMbit/s 广域网接口卡，两台路由器互为冗余配置，分别连接不同的广域网环路，实现冗余的双环广域网方案。⑦电源设备。系统配备两路独立电源，采用无缝自动转换、稳压和隔离功能的模块化智能电源屏，并配置两套互为热备的在线式 UPS 电源设备。采用免维护蓄电池，持续供电时间为 30min。设置 20kVA 的电源屏及双机并接热备的 20kVA UPS 电源系统。调度中心系统配备了电源防雷设备。

2) 调度所设备包括：①调度员工作站。采用高性能 PC

工作站，其操作系统为 Windows，主要实现监控管辖区段范围内列车运行位置、指挥列车运行的功能，包括站场显示、运行图管理、调度命令管理、站存车及列车编组信息显示、进路操作显示、调车计划浏览等。根据调度区的划分，可设置 1 套或多套调度员工作站。②助理调度员工作站。采用高性能 PC 工作站，操作系统为 Windows，主要用来实现无人车站的调车作业计划的编制、调整和指挥等功能。可以监视车站站场显示、列车计划、调车计划和实际运行图，并可通过鼠标实现调车作业计划的人工编制和调整。它包括站场显示、运行图浏览、调度命令查询、站存车及列车编组信息管理、进路操作显示及调车计划编制、浏览及提交确认等，根据调度区的划分，可设置 1 套或多套调度员工作站。③控制工作站。采用高性能 PC 工作站，操作系统为 Windows，主要实现调度中心人工进路操作控制、闭塞办理、非常处理等功能，包括站场显示、人工进路操作等。每个调度台设置 1 套控制工作站。④综合维修工作站。采用高性能 PC 工作站操作系统为 Windows，主要用于设备日常维护、天窗修、施工及故障处理方面的登销记手续办理，并具有设置临时限速，区间、股道封锁等功能，包括站场显示、运行图浏览、调度命令查询、所有行车设备的现场维修调度指挥等。每个调度台设置 1 套综合维修工作站。⑤值班主任工作站。采用高性能 PC 工作站，操作系统为 Windows，主要实现行车信息显示、下达调度命令、查询列车运行调整计划和实际列车运行图的功能。调度中心设置 1 套值班主任工作站。⑥计划员工作站。采用高性能 PC 工作站，操作系统为

Windows，主要实现列车日班计划的编制和下载至 CTC 的功能。计划员工作站主要是为没有开通 TMIS 的路局而设的。当它设有 TMIS 时，可由 TMIS 下达给 CTC 系统。⑦车站子系统。车站子系统设备分为机房设备和运转室设备。车站子

系统的设备构成可因联锁设备是 6502 型电气集中设备还是计算机联锁设备而略有差异（见图 2.6-36）。当联锁设备为 6502 型电气集中设备时，其车站自律机需配备输入采集机和驱动输出机；当计算机联锁设备时，车站仅配逻辑机。

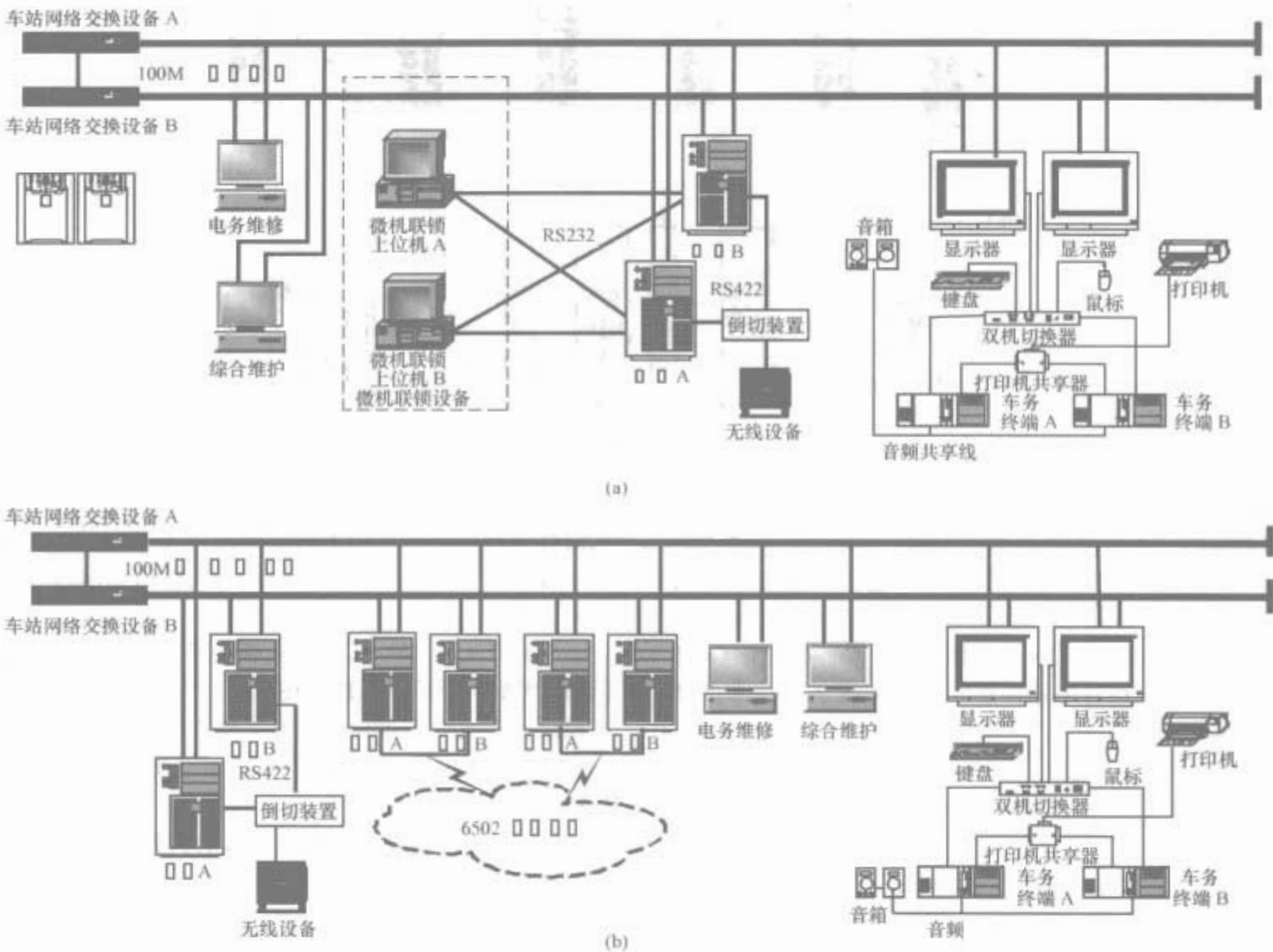


图 2.6-36 计算机联锁和 6502 车站的 CTC 车站子系统设备配置
(a) 计算机联锁车站 CTC 车站子系统；(b) 6502 车站 CTC 车站子系统

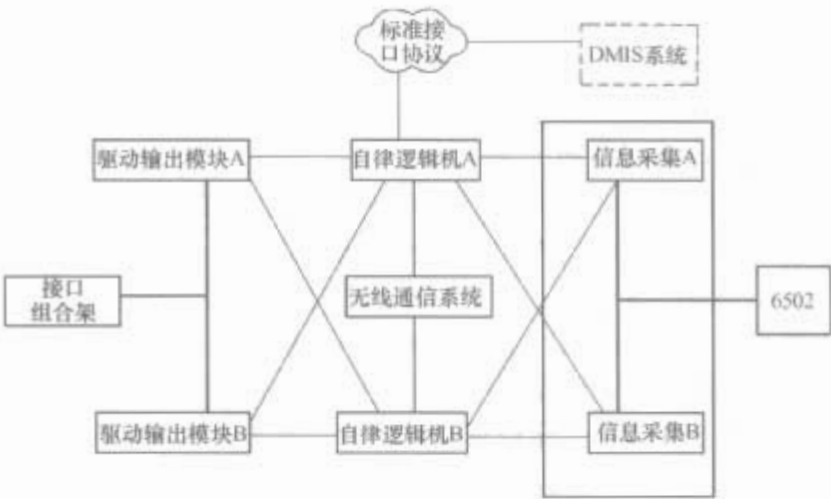


图 2.6-37 车站自律机系统结构

车站自律机是分散自律 CTC 的关键设备，属车站子系统，安装于车站机房。它可完成接收调度中心的列车运行调整计划、直接操作指令和车站值班员直接操作指令，经检测无冲突后适时发送给车站联锁系统执行；实时接收车站信号设备状态表示信息进行列车车次号跟踪，收集行车运行实际数据，并上传至调度中心；掌握车站联锁系统对进路命令执行的情况，并根据反馈信息对有关进路进行必要的调整；接收相邻各两站的实际运行图和设备状态信息等功能。

自律机是 CTC 车站系统的核心，车站的自律智能逻辑

运算、输入信息采集、输出控制、和其他系统的通信联系等均由自律机完成。车站自律机系统结构如图 2.6-37 所示。

自律逻辑机负责接收中心传来的运行调整计划和调车计划，根据计划进行自律逻辑运算，产生相应的进路操作命令，并根据实际列车走行情况进行相应的自律检查，协调车站调车作业与列车作业的冲突，最大限度地保证列车的正常运行和调车作业的效率；同时还负责与其他系统，如无线系统、计算机联锁系统等的信息交互。自律逻辑机原理如图 2.6-38 所示。

(3) 软件系统结构。软件系统由以下模块组成：

- 1) 站场显示与控制模块 (CMI-Ctc man-machine interface)。
- 2) 运行图浏览模块 (CPV-Ctc plan view)。
- 3) 运行计划调整模块 (CPM-Ctc plan management)。
- 4) 计划系统模块 (CPS-Ctc plan system)。
- 5) 调车作业管理模块 (CSM-Ctc shunting management)。
- 6) 调度命令管理模块 (CMD-Ctc coMmanD)。
- 7) 行车日志模块 (CTL-Ctc train log)。
- 8) 综合维修管理模块 (CIM-Ctc integration management)。
- 9) 电务维护管理模块 (CMR-Ctc maintenance record)。
- 10) 环境监控模块 (CEM-Ctc environment monitor)。

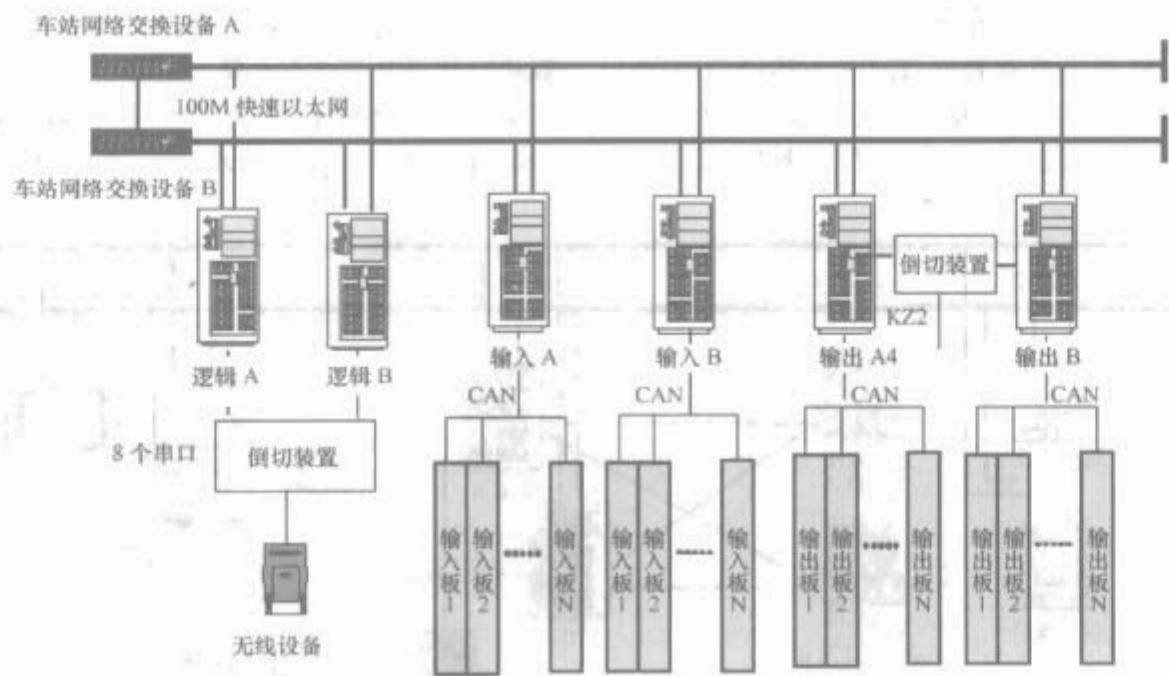


图 2.6-38 自律逻辑机原理

3.1.4 铁路列车控制系统

中国铁路列车控制系统简称 CTCS (Chinese train control system)，是保证列车行驶安全、高速、高效运行的信号安全的控制系统。其系统构成借鉴欧洲铁路列车控制系统 ETCS (European Train Control System) 的概念，参照 ETCS 的成功经验，结合中国铁路实际，按照系统技术条件和功能将 CTCS 系统划分为不同的等级。

3.1.4.1 CTCS 系统分级

CTCS 系统根据功能要求和设备配置划分，分为 0~4 应用等级。

(1) CTCS 0 级。为了规范的一致性，将目前干线铁路应用的地面信号设备和车载设备定义为 CTCS 0 级。CTCS 0 级由通用机车信号+列车运行监控装置组成。CTCS 0 级的控制模式采用速度—距离模式曲线控制，它在既有地面信号设备的基础上，采取大储存方式将线路数据全部储存在车载设备中，靠逻辑推断地址调取所需的线路数据，结合列车性能计算给出目标距离式制动曲线。它可在进出站口增加点式设备，加强核对地址，减少逻辑推断地址错误。

(2) CTCS 1 级。CTCS 1 级由主体机车信号+安全型列车运行监控装置组成，面向 160km/h 及以下的区段。在既有设备基础上强化改造，达到机车信号主体化要求；增加点式设备，实现列车运行安全监控功能。利用轨道电路完成列车占用检测及完整性检查，连续向列车传送控制信息。CTCS 1 级的控制模式为目标距离式，采取大储存方式将线路数据储存在车载设备，靠逻辑推断地址调取所需线路数据，结合列车性能计算出目标距离制动曲线。在车站附近增加点式信息设备，传输定位信息，减少逻辑推断地址错误。

CTCS 1 级与 CTCS 0 级的差别在于，它提高了系统的安全性，是对 CTCS0 级的增强。

(3) CTCS 2 级。CTCS 2 级是基于轨道电路和点式信息设备传输信息的列车运行控制系统，面向提速干线和客运专线，适用于各种限速区段，地面可不设通过信号机。功能较为齐全、符合国情。轨道电路完成列车占用检测及完整性检查，连续向列车传送列车前方轨道空闲状态；点式信息设备传输位置校正信息、进路参数、线路参数、临时限速等。CTCS 2 级采取连续式一次模式曲线控制系统，其闭塞方式可称为准移动闭塞。

(4) CTCS 3 级。CTCS 3 级是基于无线通信（如 GSM-R）的列车运行控制系统。该等级可以叠加在既有的干线信

号系统之上。轨道电路完成列车占用检测及完整性检查，点式信息设备提供列车用于测距修正。无线通信系统实现地—车间连续、双向的信息传输，行车凭证由地面无线闭塞中心 RBC 产生，通过无线通信系统传送至车上。

(5) CTCS 4 级。CTCS 4 级是基于无线通信（如 GSM-R）的列车运行控制系统，由地面无线闭塞中心（RBC）和车载设备完成列车占用检测及完整性检查。点式信息设备用于列车测距修正。其他同 CTCS3 级系统。

3.1.4.2 CTCS 体系结构

CTCS 的体系结构按铁路运输管理层、网络传输层、地面设备层和车载设备层配置，如图 2.6-39 所示。



图 2.6-39 CTCS 的体系结构

(1) 铁路运输管理层。铁路运输管理系统是行车指挥中心，以 CTCS 为行车安全保障基础，通过通信网络实现对列车运行的控制和管理。

(2) 网络传输层。CTCS 网络分布于系统的各个层面，通过有线和无线通信方式实现数据传输。

(3) 地面设备层。地面设备层主要包括列控中心、轨道电路和点式设备、接口单元、无线通信模块等。列控中心是地面设备的核心，根据行车命令、列车进路、列车运行状况和设备状态，通过安全逻辑运算，产生控车命令，实现对列车的控制。

(4) 车载设备层。该层是列车控制的主体，具有多种控制模式，并能适应轨道电路、点式传输和无线传输方式。车载设备层主要包括车载安全计算机、连续信息接收模块、点式信息接收模块、无线通信模块、测速模块、人机界面和记录单元等。

3.1.4.3 CTCS 系统的组成

CTCS 体系的构建原则是以地面设备为基础，车载与地面设备统一设计。系统从需求出发，参照国际标准，按功能划分等级。CTCS 系统组成如图 2.6-40 所示。

(1) CTCS 0 级。CTCS 0 级为既有线的现状，由通用机车信号和运行监控记录装置构成，地面设备为既有轨道电路方式。

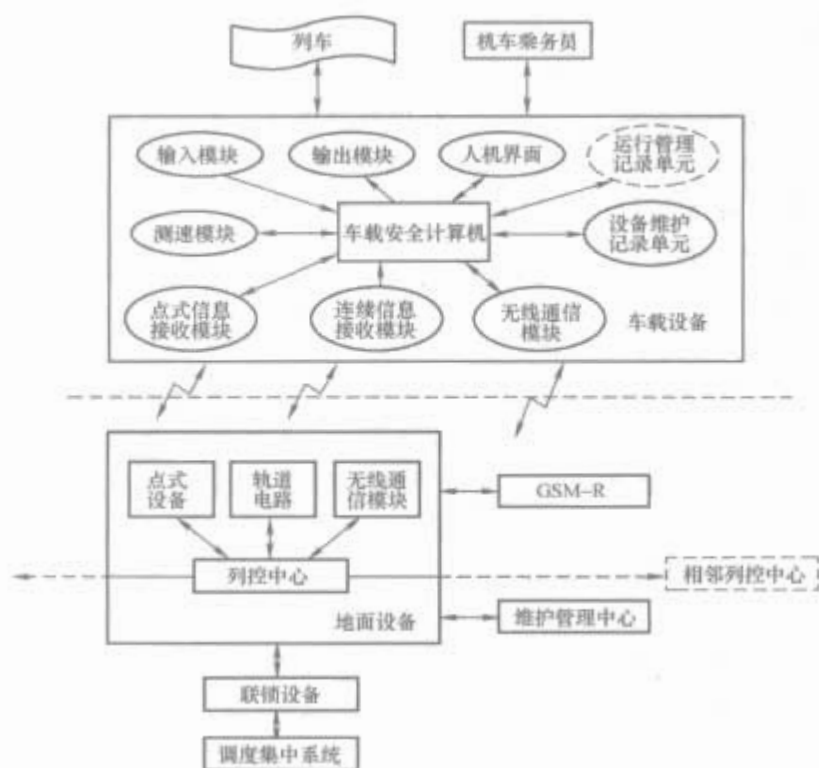


图 2.6-40 CTCS 系统组成

(2) CTCS 1 级。地面子系统由轨道电路和点式信息设备组成，轨道电路完成列车占用检测及列车完整性检查，连续向列车传送控制信息；车站正线采用与区间同制式的轨道电路，侧线采用与区间同制式的叠加电码化设备。点式信息设备设置在车站附近，主要用于向车载设备传输定位信息、进路信息和临时限制速度信息。

车载子系统由主体机车信号、点式信息接收模块和安全型运行监控记录装置组成。主体机车信号主要完成轨道电路信息的接收与处理。点式信息接收模块主要完成点式信息的接收与处理。安全型运行监控记录装置主要实时检测列车运行速度，对列车运行控制信息进行综合处理，控制列车按命令运行。

(3) CTCS 2 级。CTCS 2 级的地面子系统由列控中心、轨道电路和点式信息设备组成。轨道电路完成列车占用检测及列车完整性检查，连续向列车传送其前方轨道分区空闲数目。点式信息设备用于向车载设备传输定位校正、进路参数和临时限速等信息。列控中心根据列车占用信息及进路状态计算列车可行车距离及列车速度曲线，并传送给列车，同时对可变应答器实现编码输出。

CTCS 2 级的车载子系统由连续信息接收模块、点式信息接收模块、测速模块、设备维护记录单元、车载安全计算机、人机界面和运行管理记录单元等组成。其中，连续信息接收模块完成轨道电路信息的接收与处理；点式信息接收模块完成点式信息的接收与处理；测速模块实时检测列车运行速度并计算列车走行距离；设备维护记录单元对接收信息、系统状态和控制动作进行记录；车载安全计算机对列车运行控制信息进行综合处理，生成控制速度与目标距离模式曲线，控制列车按命令运行；人机界面作为车载设备与机车乘务员交互的设备；运行管理记录单元可以规范机车乘务员驾驶、记录与运行管理相关的数据。

(4) CTCS 3 级。CTCS 3 级的地面子系统由无线闭塞中心 RBC、无线通信 GSM-R（GSM-R，参见通信章节）地面设备、点式设备和轨道电路组成。其中，RBC 是使用无线通信手段的地面列车间隔控制系统，它根据列车占用情况及进路状态向所管辖列车发出行车许可和列车控制信息，使用的安全数据通道不用于话音通信；GSM-R 地面设备作为系统信息传输平台完成地—车信息交换；点式设备主要提供

列车定位校正信息；轨道电路主要用于列车占用检测及列车完整性检查。

CTCS 3 级的车载子系统由 GSM-R 车载设备、点式信息接收模块、测速模块、设备维护记录单元、车载安全计算机、人机接口、运行管理记录单元组成。其中，GSM-R 车载设备作为系统信息传输平台，完成车—地信息交换；点式信息接收模块完成点式信息的接收与处理。测速模块实时检测列车运行速度并计算列车走行距离；设备维护记录单元对接收信息、系统状态和控制动作进行记录；车载安全计算机对列车运行控制信息进行综合处理，生成目标距离模式曲线，控制列车按命令运行；人机接口作为车载设备与机车乘务员交互的接口；运行管理记录单元规范机车乘务员操作，记录与运行管理相关的数据。

(5) CTCS 4 级。CTCS 4 级是基于无线传输信息的列车运行控制系统。CTCS 4 级由 RBC 和车载验证系统共同完成列车定位和列车完整性检查，它由地面子系统和车载子系统组成。

CTCS 4 级的地面子系统由 RBC、GSM-R 地面设备组成。其中，RBC 是使用无线通信手段的地面列车间隔控制系统，根据列车占用及进路状态向所管辖列车发出行车许可和列车控制信息，使用的安全数据通道不用于话音通信；GSM-R 地面设备作为系统信息传输平台完成地—车信息交换。

CTCS 4 级的车载子系统由 GSM-R 车载设备、测速模块、设备维护记录单元、车载安全计算机、人机接口、列车完整性检查设备、全球卫星定位或其他定位校正设备和运行管理记录单元组成。

3.1.4.4 CTCS 系统功能

(1) 基本功能。在不干扰机车乘务员正常驾驶的前提下，有效地保证列车运行安全。

(2) 安全防护功能。防止列车无行车许可运行，超速运行，超过进路允许速度，超过线路结构规定的速度，超过机车车辆构造速度，超过临时限速及紧急限速，超过铁路有关运行设备的限速，溜逸等，测速环节应保证一定范围内的车轮滑行和空转不影响 ATP 的功能，并具有轮径修正能力。

(3) 人机界面功能。为机车乘务员提供必需的显示、数据输入及操作装置；能以字符、数字及图形等方式显示列车运行速度、允许速度、目标速度和目标距离；可实时给出列车超速、制动、允许缓解等表示，以及设备故障状态的报警；机车乘务员输入装置可配置必要的开关、按钮和数据输入装置；具有标准的列车数据输入界面，可根据运营和安全控制要求对输入数据进行有效性检查。

(4) 检测功能：①具有开机自检和动态检查功能；②具有关键数据和关键动作的记录功能及监测接口。

3.2 编组站自动化系统

编组站是铁路货运列车的加工工厂。其作业流程为到达作业（即货运列车到达作业）、解体作业（即到达的货物列车按照去向分解到对应调车场内）、编组作业（即货车根据新的去向重新集结成车列的过程）、发车作业（即新集结的列车按规定的时间发往区间的过程）。为提高编解的效率，一般编组站均设有驼峰。驼峰是完成列车解体与重新编组的核心设备之一，也是编组站加工列车不可缺的关键设备，其作业效率直接关系到编组站的作业效率。驼峰控制系统包括溜放钩车的速度控制、进路控制，以及推送机车的速度控制。驼峰自动化成为编组站现代化的前提条件，我国驼峰自

动化研究始于20世纪60年代,至90年代开始大规模推广,2006年,我国自动化驼峰达到95%以上。

我国探索编组站综合自动化工作较早,1989年在郑州北编组站进行了编组站现代化的尝试,第一次引进国外的信息处理系统、自主研发了驼峰自动化控制系统、编尾微机联锁系统及站内无线通信系统,调度信息处理系统与驼峰自动化控制系统进行了信息联通,实现了国内首个编组站现代化的模式,即所有与车列加工过程有关的设备实现了计算机控制,且调度信息处理系统与驼峰自动化控制系统实现了简单的联通,是当时最先进的水平。目前,国内技术集成的成都北编组站综合自动化系统将所有与加工车列有关的过程控制系统全部集成于一个系统,实现统一的自动化控制。

3.2.1 编组站现代化系统

编组站现代化系统一般包括信息处理系统、作业过程控制系统和进程控制系统3类系统。

信息处理系统是利用计算机和通信网络完成基本计划、解体作业计划、编组作业计划、站内调车作业计划等自动编制。将作业计划变成控制数据传给溜放作业过程控制系统,对溜放作业及其他作业进行实时控制,将作业实施结果反馈给信息处理系统,并对站内货车的移动进行追踪管理和报表统计。

作业过程控制是编组站现代化的核心,一般采用分散控制、集中管理的分布式系统结构。系统按功能分为进路控制、溜放速度控制和推送速度控制3个子系统,通过网络接口与主机连接,形成自动化过程控制系统。主机除管理各子系统外,还负责与编组站信息处理系统通信。推送速度控制子系统包括地面控制设备和机车控制设备。地面控制设备有无线电台、计算机、计轴传感器和地面联锁信号发送装置;机车控制设备包括车载计算机、无线电台、接收感应器和机车走行速度测量设备等;机车控制设备可自动接收地面计算机发出的推送速度指令,实现推峰速度控制。进路控制子系统根据调车作业计划实时控制道岔转换,使车组溜入预定的调车线,包括过程控制计算机、快速道岔转辙机、分路灵敏度应变速度快的驼峰轨道电路、电磁踏板等设备。车组溜放速度控制子系统包括计算机、测量设备和调整车组溜放速度的调速工具。测量设备包括测量溜放车组速度的测速雷达,测量调车线空闲长度的测长设备,测量车组走行阻力的测阻设备,以及测量车组轴重信息的测重设备;调速工具有车辆减速器、减速顶、加速顶、绳索牵引加速小车和尾部停车器等设备,自动控制溜放车组的走行速度,实现间隔调速和目的调速。

进程控制系统设备包括调车场头部信号联锁设备,用于驼峰调车场的溜放作业和其他调车作业;到达场、出发场和到发场的联锁设备用于列车的到发进路、调车进路、驼峰调车场尾部联锁控制。

编组站现代化技术设备还包括站内无线通信设备,调车作业计划的自动传递设备,自动抄车号设备。此外,编组站现代化还需要自动提钩,以及自动摘、接风管等设备。

3.2.1.1 编组站货车信息处理系统

(1) 主要功能。编组站货车信息处理系统(yard information system, YIS)是指以编组站设备及到达列车所包含的信息为基础,根据管理层(如铁路局)和现场作业的实际要求,制定编组站工作的基本计划和解体、编组、站内调车等作业计划的编制,管理全站的现在车,进行各项统计和预确报处理,并与过程控制系统进行通信的自动化系统。编组

站货车信息处理系统利用计算机及通信技术实现编组站信息处理自动化。信息处理系统是编组站综合自动化的基础与核心,是编组站所有作业的依据和控制指令,主要完成:

1) 制定基本计划。基本计划主要包括日班计划和阶段计划,基本计划的编制涉及车流预测、推算,以及机车、线路和设备的动态运用。其编制是一个旋进滚动式过程,需借助智能决策支持系统辅助完成本项任务。

2) 编制作业计划。依据基本计划及现车等信息自动生成调车作业计划,包括车列的解体钩计划、编组钩计划、车辆取送钩计划等,并完成计划的修订、打印和传递等。

3) 信息管理。自动完成列车预确报的接收、处理和发送,自动实现对货车的动态追踪,满足现车查询,并能根据车站运输管理的需求编制货报和统计报表。

4) 变更处理。由于铁路运输的生产过程作业环境及计划的变更,必然会导致编组站作业的变更,需要系统进行处理。主要包括站内作业或车流变化所需的即时变更处理,计算机系统故障后的运转恢复变更处理,以及根据铁路局调度命令的变更处理。

(2) 信息处理过程。编组站信息处理涵盖了列车进入编组站、解体、溜放、编组,以及列车驶出编组站的全过程,主要处理过程如下:

1) 在列车到达编组站前,相邻编组站或发出摘挂列车的中间站,将列车车次、编成等信息通过计算机网络送到本站,通过显示器对输入数据进行必要的核对和修改后,生成“列车到站编组顺序表文件”,存入计算机。

2) 列车进入编组站前,由区间调度集中通过编组站计算机进路控制系统和基础设备,为列车排列接车进路,并将列车接入站内。计算机核对到达列车的实绩和到达预确报,并进行必要的修改,准确无误后存入“到达线货车文件”,供列车解体使用。

3) 列车解体前,计算机根据“到达线货车文件”编制列车解体作业计划(钩计划)的方案,如果该方案可行,即作为正式钩计划,打印“列车解体作业通知单”,并下达执行。

4) 当列车通过驼峰解体时,计算机控制系统对调车机车进行推峰速度控制,对道岔进行进路控制,同时对溜放车辆进行速度控制,以保证溜放车辆必要的间隔,车列解体完成,计算机将实际作业结果数据,存入“调车线货车数据文件”。

5) 计算机根据“调车线货车数据文件”和基本计划编制编组计划,通过进路控制系统对解体后的车辆进行编组,对摘挂列车进行编组,并将编组完毕列车的实际结果数据存入“出发线货车数据文件”。

6) 列车出发前,计算机根据“出发线货车数据文件”编制列车出发计划,通过进路控制和调度集中将列车送出车站。

7) 计算机随时将作业结果登入货报统计文件,并传送到路局计算中心,作为分析和制定计划的依据。编组站作业流程示意图如图2.6-41所示。

(3) 外部接口条件。YIS系统功能的执行必须充分采集相关业务系统的基础信息,其与外系统的接口关系如图2.6-42所示。

1) YIS与铁路局。铁路局是编组站的上级机构,它负责制定日班计划,向车站下达任务指标和调度命令,并分析车站作业任务完成情况。YIS则向铁路局上报各阶段运用车保有量及每日18时的统计数据。

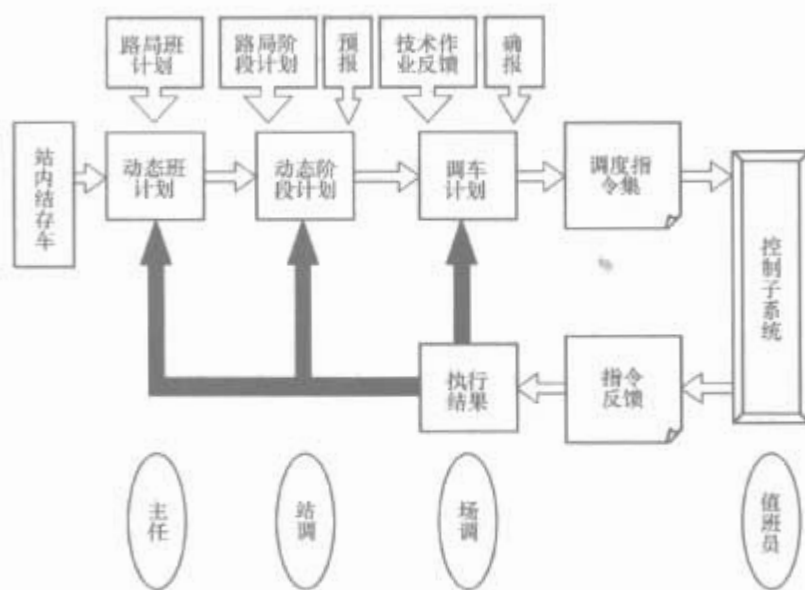


图 2.6-41 编组站作业流程示意图

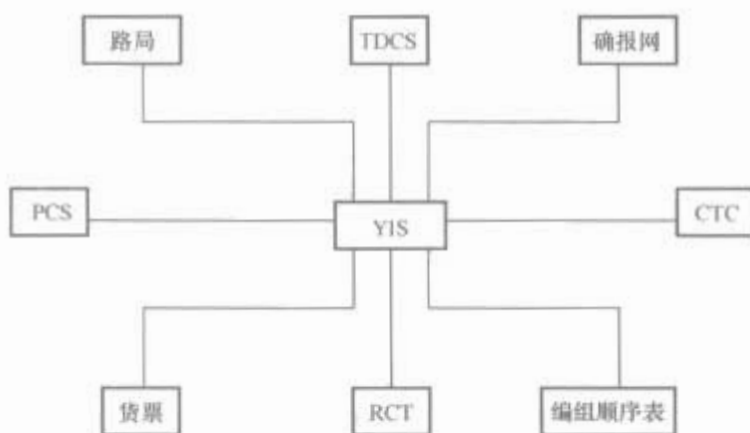


图 2.6-42 编组站信息处理系统的外部接口

2) YIS 与 TMIS。TMIS 负责收集、管理全国铁路干线，以及所有编组站内的列车信息和车辆信息。YIS 是 TMIS 的重要组成部分，按照 TMIS 的要求传递和接收有关信息。

3) YIS 与确报网。YIS 从确报网获取到达列车预确报，并向确报网发送出发列车编组顺序表。在 TIMS 建成后，确报信息将由计算机生成，并由计算机网络传送。

4) YIS 与 PCS (Process Control System)。编组站过程控制系统完成对车列解体、编组和机车工况的控制。YIS 向 PCS 发送调车作业计划及车辆信息，PCS 按作业命令控制溜放作业，将驼峰溜放结果信息反馈至 YIS，为 YIS 编制、修订作业计划提供正确的现在车信息，保证调车作业的连续性。

5) YIS 与 CTC 具有辅助车站调度员决策的表示盘，可显示 YIS 提供的编组站内现在车信息，是实现进路集中控制的技术手段之一。

6) YIS 与货票。TMIS 建成之前，货票是随列车到达或出发的有关货物票据，记载每一车辆所运货物的详细信息。YIS 中的车辆货运信息应与实际货票保持一致。TMIS 建成后，货票信息传递功能由 TMIS 完成。

7) YIS 与车辆实时跟踪系统 RCT (real-time car tracking)。车辆实时跟踪系统负责监测列车的到达、出发及车辆在编组站内的移动状态，实时跟踪站内车辆的位置和状态变化。YIS 向 RCT 提供有关现场及作业计划信息，RCT 向 YIS 报告站内现在车的实时移动轨迹信息，实现全场计划信息与实时信息的闭环控制。

8) 编组顺序表。编组顺序表即随列车到达或出发的列车编组顺序表，该表记载列车信息、全部车辆及其所装货物的信息，是 YIS 的输入和再输出信息。

3.2.1.2 编组站过程控制系统

过程控制系统根据控制数据，利用计算机和调速工具、联锁等控制设备，对货车的解体溜放作业和列车到达、出发进路等进行实时控制。过程控制系统按功能可分为推送速度控制、进路控制和溜放速度控制 3 个子系统，各子系统经网络接口与主机连接，构成完整的编组站过程自动化控制系统。该系统与信息处理系统结合，配以调度指挥系统、调车场尾部微机集中联锁系统和无线通信系统。过程控制系统与 YIS 系统结合，可实现编组站内从列车到达与车辆信息采集、调度指挥、解体、编组到产生新的列车出发的全作业过程的综合自动化。

(1) 推送速度控制系统。驼峰推送是指调车机车将车列推向峰顶的过程。推送速度自动控制通过无线装置对驼峰机车进行遥控，自动控制驼峰机车起动、停止和速度的变化。系统由地面控制系统、机车控制设备和信息传输通道 3 部分组成。地面控制设备包括无线电台、计算机、计轴传感器和联锁。机车控制设备包括车载计算机、无线电台、接收感应器和速度测量设备。遥控机车可自动接收地面设备发出的推送速度指令，实现变速或定速推峰。信息传输通道分为有线通道和无线通道，国内外驼峰机车广泛采用无线通道。

地面控制系统中的过程控制计算机根据溜放车组长度、相邻两车组分路道岔位置、走行性能差异及车组溜放距离等因素，计算车组的最大允许推送速度。当有多台驼峰机车作业时，计算机通过无线电台不仅发送推送速度信息，而且发送选择遥控对象（作业机车）的信息。溜放时，计算机根据设置在峰顶的计轴器对车组计轴，并与解体作业计划表中的各钩车轴数核对，检查提钩作业，发现错误便自动记录并报警。前车组脱钩后，立即取出后一车组的推送速度数据，发出推送速度指令。

车载无线电台接收地面电台发送的驼峰机车选择和推送速度等信息。接收感应器接收地面联锁发送装置通过地面股道送来的联锁信息，经车载计算机确认联锁条件满足。机车控制设备通过速度传感器计算机车实际推送速度，并与给定的标准推送速度比较，控制推送机车的牵引和制动等级，使推送机车按给定速度推进。同时，机车车载设备和管理主机将机车和车组溜放作业信息向地面控制系统发送，保证地面过程控制计算机和值班人员随时监视作业状况。当遇有“追钩”、溜错股道、前行车离开减速器速度偏低、夹停等情况发生时，地面计算机系统可修正推送速度，发出减速、停轮、送禁溜车或继续溜放等命令。

当机车被遥控实现推峰速度控制时，其设定的范围应为 3~15km/h，速度级差不大于 2km/h。速度控制误差的均方差不大于 0.6km/h。

(2) 车组溜放速度控制系统。该系统利用包括计算机、测试设备和调整车组溜放速度的调速工具，实现溜放车组的间隔调速和目的调速。

在驼峰的平、纵断面和峰高的设计中，将提高平均溜放速度作为基本原则。由于不同溜放车组的走行性能差别较大，必须在驼峰头部咽喉区设置间隔调速工具，以保证相邻溜放车组之间的合理间隔与道岔及时转换。溜放车组进入调车线后，为使溜放车组以安全连挂速度与停留车连挂或在预定地点停车，在调车线上也需要设置调速工具，对溜放车组进行速度调整。设在调车线上的调速工具称为目的调速工具。在溜放线路上通常设置三个调速部位，一、二部位设置在驼峰头部咽喉区，主要用作间隔调速；三部位设在调车线上，用于目的调速。在自动调速系统中，按调速工具的配置

不同,调速方式大致可分为3种方式:

1) 点式调速(亦称目标射击式,简称打靶式)。该方式的调速工具设于溜放线路的特定地点(称作调速部位)。通常,在驼峰溜放道岔区的两个固定部位设置减速器,用以实现间隔制动控制;在调车线始端处设置减速器,用于实现目的制动控制。在调速线中部也可根据实际情况安装第2个或多个目的调速减速器。点式调速是利用减速器调整溜放速度,使受控车组离开减速器后自由溜行,并与前方停留或行进中的车组安全连挂的速度控制(即打靶控制)方式。点式调速方式计算出口速度的基本的数学模型由式(2.6-1)表达

$$v_e = v_E^2 + 2gL(W - i) \times 10^{-3} \quad (2.6-1)$$

式中: v_e 为车组离开减速器时的速度; v_E 为车组进入下一调速位的入口速度或安全连挂速度; L 为本调速位至下一部位入口的距离或车组溜到目的地的距离; W 为车组溜放时的单位基本阻力; i 为线路坡度。

从式(2.6-1)可知,车辆进入减速器之前,由测阻设备测得车组走行阻力,测长设备计算离开减速器后的走行距离。线路坡度及 v_E 为已知,根据式(2.6-1)可得出 v_e 。测速设备不断地测量车辆实际速度 v_t , 并与 v_e 比较,当 $v_t > v_e$ 时,控制减速器对车辆调速,使车辆以 v_e 离开减速器。目前该制式已逐步被点连式取代。

2) 连续式调速。连续式调速是指在溜放线路上连续设置调速工具,车辆在溜放过程中连续调整速度。该方式根据驼峰纵断面及减速顶的制动能力,沿钩车溜放进路布置加(减)速顶群,用以实现间隔控制及目的控制。本质上减速顶为离散分布设置模式,每一个减速顶的制动力较小,当车辆经过一个减速顶时,其速度变化较小。但由于多个减速顶的接续作用,其控制效果相当于连续调速控制。

减速顶具有随钩车速度增高制动力增强的特点,只要减速顶布置合理,可不对减速顶实施特殊控制,即可取得良好的控制效果。但当钩车溜放速度较高时,可能造成钩车越顶脱轨事件,限制了溜放速度的提高,即限制了驼峰解体能力。该制式仅适用于小能力驼峰。

3) 点一连式调速。该方式是点式与连续式相结合的调速控制方式。通常是在驼峰溜放道岔区的两个固定部位设置减速器,用以实现间隔制动控制,在调车线始端安装目的调速的减速器,实现溜放车组的打靶控制。在打靶控制区安装连续调速设备,对溜放车组连续调速,实现全线安全连挂的目的调速控制,其连续调速工具可采用减速顶或绳索牵引小车。该方式是我国科技工作者自主创新出来的适应我国国情的调速制式。该制式不仅可以提高机车推峰速度,而且具有良好的钩车速度控制效果,是我国现代化驼峰主要的调速控制方式。

车辆减速器控制是对设置于驼峰场内一、二、三各部位车辆减速器对溜放车辆轮对实施不同等级制动力,以期达到最佳出口速度的控制。

减速器控制系统对进入控制部位的车辆进行实时速度测量,钩车轴数的采集计算,轨道电路的空闲和占用判断,以及股道空闲长度测量,并进行计算机自适应修正,自动给出合理的计算出口速度,动态输出控制减速器对溜放车辆制动时间的长短,达到对溜放钩车的自动调速。所控部位出口速度的处理原则如下:

系统按车重设定固定的一部位减速器出口速度 v_{1OUT} , 根据前后钩车间隔及车长调整钩车速度,实现间隔制动控

制。为取得最大的溜放效率,二部位减速器的钩车出口速度应为三部位减速器所允许的最大入口速度。基本二部位减速器出口速度 v_{2OUT} 的计算公式如下

$$v_{2OUT} = \sqrt{18^2 + 2g' \left[W - \left(\frac{h_{2,3}}{L_{2,3}} - K_h \right) \right] L_{2,3} \times 10^{-3}} \quad (2.6-2)$$

式中: v_{2OUT} 为二部位减速器调整实施前的基本出口速度, km/h; 18 为三部位减速器允许的最大入口速度, km/h; $h_{2,3}$ 为二部位减速器出口到三部位减速器入口的线路能高, h; $L_{2,3}$ 为二部位减速器出口到三部位减速器入口的线路长, m; K_h 为修正系数; g' 为引入转动惯量后的重力加速度修正值, $g' = 9.5 \text{ m/s}^2$; W 为按车重分级的车辆走行基本阻力。

三部位减速器的出口速度要求钩车以较高的允许速度溜行,与股道内停留车安全连挂。可按全线打靶方式计算三部位减速器出口速度 v_{3OUT} , 即

$$v_{3OUT} = \sqrt{v_M^2 + 2g' \sum_{a=1}^{a=n} [W - (i_a - K_{ax})] L_{ax} \times 10^{-3} - N_C K_v}$$

式中: v_{3OUT} 为三部位预定出口速度, km/h; v_M 为连挂速度,正常连挂速度 $v_M = 5.0 \text{ km/h}$ (1.4 m/s), 限速连挂速度 $v_M = 3.6 \text{ km/h}$ (1.0 m/s); g' 为引入转动惯量后的重力加速度修正值, $g' = 9.5 \text{ m/s}^2$; W 为按车重分级后的车辆阻力; i_a 为线路各段坡度; K_{ax} 为线路各段坡度修正参数; L_{ax} 为线路各段长度, m; N_C 为钩内车辆数; K_v 为长钩车速度修正系数。

根据我国现行铁道行业标准—自动化驼峰技术条件,当系统对减速器实行自动控制时,车组实际出口速度控制其均方差不大于 0.5 km/h; 通常,出口速度控制误差大于 3 km/h 的概率应低于 0.2%。

3.2.1.3 编组站进路控制

编组站进路控制包括到达场进路控制、驼峰场进路控制、调车场尾部进路控制、出发场进路控制,以及站内所有其他场的进路控制。驼峰场进路控制主要包括推峰进路、溜放进路和调车进路。进路控制应满足单推单溜、双推单溜、双推双溜、多推双溜等编组站解体作业方式的要求。

(1) 推峰进路控制系统。系统实现驼峰推送机车将待解体车列推向峰顶的进路控制。其进路中的道岔既可人工手动控制,也可自动控制。当进路开通并锁闭后,驼峰信号机方可开放。进路上的调车信号机随驼峰信号机的开放而开放。推峰进路控制的基本要求如下:

1) 驼峰信号机与敌对信号机、进路中的道岔、峰下交叉渡线的背向道岔及其防护进路的有关道岔实现联锁、照查。在驼峰信号机开放或处于预推作业时,推送进路与禁溜线、迂回线连接的道岔及其他有关道岔应实施锁闭。但解散车辆时与分路道岔不联锁。

2) 驼峰场办理预先推送或允许推送后,到达场方可开通推送进路;到达场推送进路采用进路锁闭,车列推出到达场后,进路解锁,驼峰辅助信号机自动关闭。

3) 推送进路建立后,该进路上的调车信号机应随驼峰信号机的开闭而自动开闭。

4) 当到达场的推送进路建立,但尚未使用时,可办理人工取消作业。届时,应先关闭信号,推送进路延时解锁;被推车列占用推送进路后,该进路不能办理人工取消作业。

(2) 溜放进路控制。驼峰溜放进路是车组从峰顶摘钩溜入调车线的经路。车列在驼峰上的解体能力与相邻车组的下

峰间隔时间密切相关,其相邻车组的间隔时间越短,解体能力越高。为缩短相邻两车组的间隔时间,驼峰车组溜放作业为连续溜放。各车组的溜放进路具有共同的始端(峰顶),根据分路道岔的开向溜至不同股道。车组溜放进路采用逐段排列、逐段使用、逐段解锁的控制方式。要求前一车组离开分路道岔区段的瞬间,该分路道岔应按后续车组的进路要求及时转换,为后续车组排出一段进路。为实现逐段、适时、正确地排列溜放进路,国内外多采用溜放进路的半自动或自动控制方式,保证道岔转换控制的实时性。

驼峰溜放进路自动控制的基本原理是对应于每一待溜车组编制一个相应进路控制命令代码,并将进路代码按车组溜放顺序,人工或自动输入至系统储存。溜放作业开始后,进路代码在轨道电路的作用下依次从储存器输出,并沿与车组进路相对应的传递网络传送。当进路代码到达网络与道岔相对应的节点时,起动道岔控制电路,实现进路自动控制的目标。

由于车组溜放追踪过程的特殊性,溜放异常现象的自动处理是驼峰进路控制必须具备的能力。

(3) 列车、调车进路与机车出入库进路自动控制。进路自动控制是指除驼峰溜放进路以外的列车到发、调车作业和机车出入库的进路自动控制(即到达、出发及其他场的进路控制),它包括:

1) 列车到达进路自动控制。根据班计划规定的到达列车计划和存储的列车进路表,以及由前方站发来的要求办理列车到达进路的信息,由计算机控制站内联锁设备自动排列列车到达进路,并开放进站信号机。

2) 列车出发进路自动控制。当列车编组作业结束后,系统根据班计划规定的出发列车计划,按出发进路存储表指示的信息,控制站内联锁设备自动排列列车出发进路,并开放出站信号机。

3) 调车进路自动控制。调车进路自动控制包括站内除驼峰溜放进路以外的全部调车作业进路的自动控制。该系统根据信息处理系统送入的调车作业钩计划和存储的调车进路表,在调车人员送入要求准备调车进路的信息后,控制站内联锁设备自动排列钩作业调车进路。

4) 机车走行进路自动控制。机车走行进路自动控制包括推峰机车、驼峰调车场尾部调车机车和机车出入库等作业的进路自动控制,可由现场人员操纵进路排列开关,请求排列机车走行进路或根据请求信息和存储的机车走行进路表,控制站内联锁设备自动排列机车走行进路。

5) 到达、出发及其他场的进路控制系统设备参见调车场尾部联锁控制设备。

(4) 调车场尾部进路控制。该进路控制通过调车场尾部联锁设备完成。联锁具有提高驼峰调车场尾部编组能力,满足驼峰调车场尾部平面调车溜放作业要求的作用。当驼峰调车场尾部编组效率低于驼峰头部解体效率时,将影响编组场的调车效率。

1) 调车场尾部平面调车作业特点。编组站驼峰调车场尾部通常可有多台调车机进行平面推送、牵引或溜放调车及机车或车列的折返作业。溜放调车作业包括单钩溜放、连续溜放和多组溜放。不同溜放模式对前方和后方进路的建立、锁闭和解锁的范围、条件和方式也各不相同。

单钩溜放。通常其车组溜放进路为一次开通并锁闭、分段解锁和建立车列的后退进路锁闭模式。车组连续溜放作业的特点是在推送过程中随推随溜,车组相继摘钩甩放,各钩车的分钩地点不能预先确定;多组溜放的作业特点是在溜放途中将已溜大车组分解成小车组,继续溜放至各自目的地。

平面溜放作业进路的选排和锁闭、解锁及退路的锁闭不能采用大站联锁的控制方式,车列前方进路只设区段锁闭而不设进路锁闭,即进路分段建立、分段使用、分段解锁。为保证机车及车列在溜放时后退的安全,机车及车列驶过的区段不解锁,即实现所谓退路锁闭。

2) 平面溜放调车作业的技术要求如下:①溜放调车作业与一般调车作业应保证牵出线溜放调车作业和不同区域的一般调车作业具有平行作业的能力。当具有多条牵出线时,应允许不同牵出线可平行进行溜放调车作业。同一调车区域内的一般调车与溜放调车不得混合作业。②溜放进路必须由牵出线通向某一股道的全部调车进路组成,允许车列停于任一道岔的信号机之前办理首次溜放进路;溜放作业可具有单办或储存两种模式。③根据溜放作业的特点,采用区段锁闭,每一个分路道岔单设道岔区段及岔前保护区段。为防止轨道电路瞬间失去分路,在道岔与基本轨接缝处加一对绝缘,构成双区段轨道电路。④为实现溜放车组的间隔控制,应保证前行车组出清道岔区段,后续车组才能进入岔前保护区段。⑤中途折返道岔解锁及转换时机控制既要保证作业安全,又要尽量减少机车或车列折返时的无效行程。在岔前折返时,允许道岔在车列占用岔前保护区段的情况下解锁并转换。⑥车组侧冲防护。由于平面溜放作业的脱钩速度和车组间距难于准确控制,一般可通过测量车辆过岔速度判定发生侧冲的可能性。当过岔速度低于某限定值时,锁闭相关道岔,实现侧冲防护锁闭。⑦溜放作业指挥方式。平面溜放作业的调车人员随车移动,固定设置的地面信号机必须与调车指挥人员的手信号相互配合。可以通过采用平面无线调车等设备提高溜放作业信号指挥的自动化程度。⑧溜放进路的退路锁闭功能。车列后退进路可具有提前解锁,随时改变车列退路或进路的能力。

3) 调车场尾部联锁系统。调车场尾部平面调车联锁实现道岔集中控制,具有车组溜放进路储存、自动选路及推送机车退路锁闭的功能。平面调车联锁必须适应连续溜放、单钩溜放等溜放作业的需求。调车场尾部平面调车联锁可有继电联锁和计算机联锁等制式。调车场尾部平面调车计算机联锁系统与正线计算机联锁系统构成相近,其特点是具有车站联锁功能及平面溜放调车功能。

①系统硬件结构。调车场尾部微机集中联锁系统的硬件系统主要包括控制台和显示器、控制命令采集机、控制监视机、联锁及溜放控制机、执表机柜等5部分,如图2.6-43所示。该系统为3层结构体系,级间采用串行通道。第Ⅰ级为控制监视层,用于人机通信。通过控制监视机向下层计算机传递控制台下发的控制命令;接收下层计算机送来的表示信息,并转送至控制台。经功能扩充,该层可以实现与调度集中系统或YIS联机。第Ⅱ层为联锁逻辑计算处理级,是系统核心部分。由联锁及溜放控制机通过下一级计算机接收现场有关信号设备状态信息,根据联锁条件和溜放技术条件完成联锁和溜放功能。通过下级计算机向现场设备发送控制命令,通过上级计算机发送表示信息。第Ⅲ层为执表级,执表机与现场信号设备通过继电电路联系。

②系统软件结构。系统软件可按如图2.6-43所示系统硬件的三层结构划分为人机对话处理、联锁逻辑处理及溜放控制、执行表示等3个子系统,各子系统之间通过专用通信软件实现信息交换。

人机对话软件完成控制命令采集、集中联锁进路预选、溜放进路控制命令储存、图像显示、记录、储存和打印等功

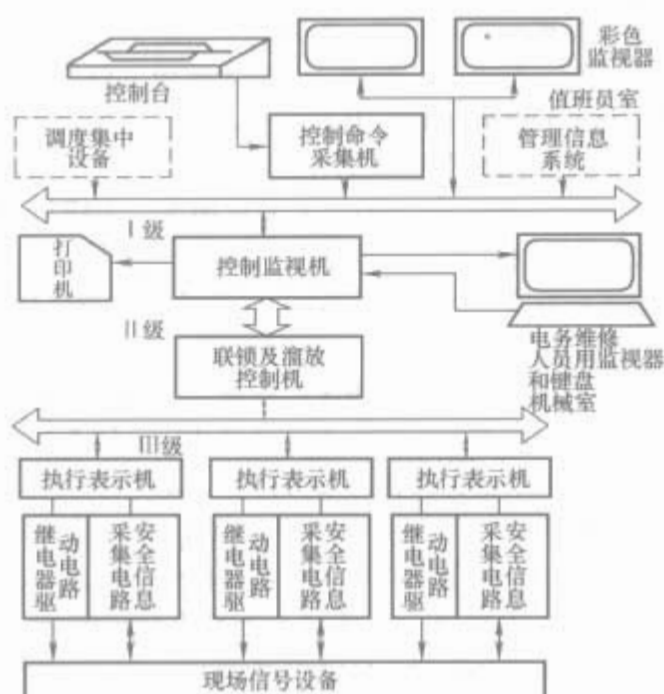


图 2.6-43 调车场尾部微机集中联锁系统硬件结构图

能。执表软件主要完成与现场信号设备间的输入、输出信息处理及与联锁控制机的通信功能。

联锁逻辑处理软件采用分层网络结构设计，程序按功能分层，每个程序模块划分为选路、确选、锁闭、开放信号、关闭信号、正常解锁、折返解锁、非常解锁等 8 个子模块，即 8 个功能层。

连续溜放和多组溜放软件的主要功用为建立溜放作业方式；判定分钩地点（区段）；在溜放车组作用下，输出并执行道岔控制代码；判定二次分钩（多组溜放）、追钩、溜错股道等；预测侧冲并报警，实现侧冲防护；溜放过程中的转线及折返作业与表示等功能。其软件系统包括作业方式建立模块、溜放处理主程序模块、准备溜放控制处理模块、追踪溜放钩车处理模块、查巡处理模块、开放信号处理模块等。

3.2.1.4 主要室外装备

(1) 调速设备。根据溜放制式的不同，可采用不同的调速工具。

1) 车辆减速器。我国用于编组站的车辆减速器主要包括非重力式车辆减速器、重力式车辆减速器和分级可调减速器等。根据驼峰编组站的要求，车辆减速器的设置位置和作用包括间隔制动及目的制动，保证溜放车组根据作业要求进入指定股道的目标地点。

2) 绳索牵引小车。绳索牵引小车以加速推送为原理工作，以基本轨为走行线路，适于编组站绳索牵引推送小车的动力传动系统，主要有电力驱动和液压驱动两种。前者采用电动机经减速箱驱动摩擦绞盘带动小车运行；后者利用低速大扭矩油马达直接驱动绞盘。小车可自动或人为地追赶离开调车线减速器的货车轮缘，并以 4~4.5km/h 的速度推送车辆，使其与调车线上的停留车连挂。小车只起推送作用，不能对超速的货车制动。采用推送小车的线路坡度以约 0.8‰ 为宜。推送小车的推送速度不得超过 5km/h，小车的返回速度约为 7km/h。

(2) 测量设备。

1) 测重设备。驼峰测重设备用于测量溜放钩车质量，为系统提供溜放车组的质量信息。作为控制非重力式减速器提供钩车平均质量等级参数，计算编组列车的质量，决定非重力式减速器的制动等级。通过测量车辆轴重实现测量溜放钩车质量。测重装置将每一辆车的所有轴重累加求取车辆质

量，并作为车辆质量分级的依据。根据车辆的质量等级求取钩车平均质量等级；也可根据车辆质量粗略地确定车辆走行阻力，即以测重代替测量车辆走行阻力，为系统控制减速器出口速度提供参数。通常车重可分为 5 级：空车（28t 以下）、一级车（28~38t）、二级车（38~48t）、三级车（48~58t）、四级车（58t 以上）。

驼峰测重传感器是测重设备的重要组成部分，按其工作原理可分为机械应变式和电气应变式两类。目前，我国使用的驼峰测重装置主要采用电气应变式压磁重力传感器，主导型产品为 T.ZY1 型塞钉式压磁测重器。该设备包括安装在钢轨腹板中轴上的塞钉式压磁称重传感器、安装在机房机柜内的 400Hz 激磁电源和质量信号处理电路。塞钉式压磁测重传感器根据铁磁材料的磁弹性效应，利用特殊磁性材料制成。根据磁弹性效应，处于外磁场中的某种铁磁材料在外加机械力作用下，其内部磁化强度矢量的大小和方向也将随之改变。传感器通过测量钢轨所受轮重产生的剪切应力测量车轮质量。其测量范围：轮重为 1~12t，允许超载 200%；静态测量误差不大于 ±2.5%；动态测量误差不大于 ±5t；传感器使用寿命不低于 500 万次；适应车速为 0~30km/h。

2) 测速设备。世界各国用于驼峰测速的设备种类很多，如轨道传感器测速、刻槽钢轨测速、激光测速、超声波测速、雷达测速等。雷达测速利用无线电波发现目标，测定目标方位、距离和测速。雷达测速具有精度高，受工频干扰小，维修简便等优点，为国内外广泛应用。雷达天线设在减速器前的适当地点，解体作业时，雷达可精确测定车组速度，及时为减速器控制提供参数。目前，我国编组站溜放车辆测速多采用 TCL-2 型 8mm 波多普勒驼峰专用测速雷达。

根据微波多普勒原理，当雷达发射的微波信号遇到运动目标时，反射的信号频率 f_2 与发送信号频率 f_1 产生差值，该差频 f_d 与运动目标速度成正比，与发射源的波长成反比，并与雷达辐射方向和运动物体方向间的夹角有关。通过测量该差频，可以正确地反映运动目标的速度。当车辆迎着雷达天线运动时， $f_2 > f_1$ ；当车辆离天线远去时，则 $f_2 < f_1$ 。经推导可得： $f_d = 2f_1 \mu \cos \theta / c$ ，式中 f_1 、 θ 和 c （光速）为常数，可见 f_d 与车速 v 成正比。通过对多普勒频率的测量，即可得到车辆速度。图 2.6-44 所示为雷达测速原理示意图。

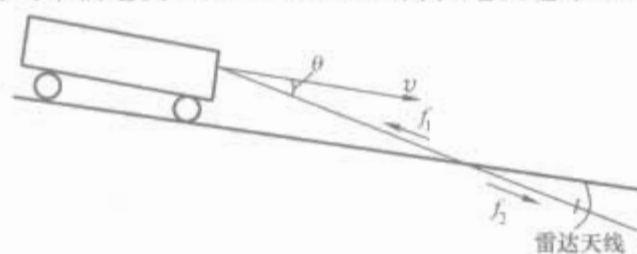


图 2.6-44 雷达测速原理示意图

3) 测阻设备。测阻设备即溜放钩车运行阻力的测量设备。测阻方式一般有踏板测阻、雷达测阻和以测重代测阻等方式。测阻设备一般应设在直线地段，以排除道岔、曲线等阻力的影响，可较为精确地测得车辆走行阻力，为系统控制减速器提供阻力参数。目前世界上采用较多的是电磁传感器（即电磁踏板）测阻。电磁传感器是利用电磁方法检测车轮压到传感器所在位置的器械。由于车辆运动的加减速速度与其在线路上的运行阻力直接相关，故可通过检测加速度实现测阻。车辆在较短的直线测阻区段上的运动可视作匀加速或匀减速运动。测量加减速速度可通过测量车辆在测阻区段始端和终端两点的速度，以及车辆经由两点的间隔时间得到，并转化为车辆运行阻力。

4) 测长设备。该设备用于测量停留车位置和调车线路股道空闲长度,为系统控制车组溜放距离提供长度参数,也称测距设备。通常采用较为经济实用的轨道电路测长法,即在被测线路上安装测长轨道电路。该轨道电路有频率测长轨道电路、直流测长轨道电路等类型。通常,最大测试距离为800~1000m,测长误差的均方差在20m以内。图2.6-45所示为直流测长轨道电路,专用测长发送器向轨道送5A恒定直流电。将轨端采样电压回送减速器控制模块,轨端采样电压随着车辆的远离而升高,与长度成正比。

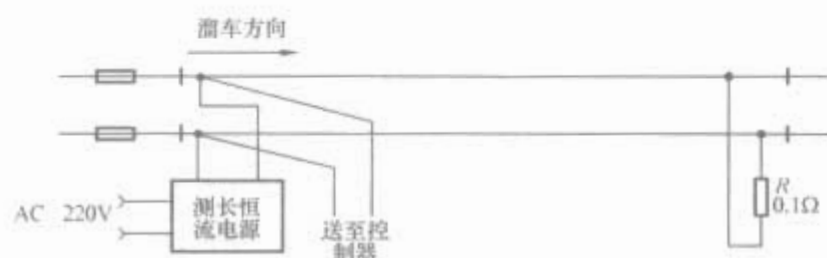


图 2.6-45 直流测长轨道电路

5) 风向风速计为计算机控制车组在减速器的出口速度提供风阻力参数。

6) 货车正面积测定装置。车辆溜行过程中受到的空气阻力随车辆正面积的不同而异。实测正面积可准确计算风阻力。

(3) 车辆自动识别装置。为管理列车和车辆,当列车进站时,必须通过识别装置对列车和车辆进行扫描,自动抄录车号,并将信息传送至计算机处理。

(4) 自动提钩和摘接风管装置。当车列由调车机车以一定速度推向峰顶解体时,由自动提钩装置按计划要求提升车钩,使车组溜入规定股道。该装置的核心部件为机械手。

(5) 编组线尾部停车器及挡车器。编组线尾部停车器及挡车器设置的主要目的是防止溜放车辆未按要求停车或停留的车辆因外力溜走。

3.2.2 我国编组站的主要驼峰自动化系统

3.2.2.1 TW-2 型系统

该系统是在TWJ-2溜放进路控制子系统、TWZ1驼峰自动集中子系统、TWK1溜放速度控制子系统和TWGC1工频测长子系统的基础上集合而成的。系统已在国内装备了上百座铁路或地方驼峰场,占我国采用驼峰自动化系统的70%以上。其系统控制硬、软件模块可根据现场需要自由配置、组合,适合大、中、小不同驼峰调车场的需要。该系统将计算机联锁技术应用到驼峰,并且在下峰整理调车进路、推送进路、场联等功能与溜放作业自动化结合方面较大的创新;率先在具有间隔制动位的站场实现全场集中操纵;实现了双推双溜的自动化作业。

系统用于驼峰溜放的调车场,实现货车车辆溜放过程中的进路、速度与推峰自动控制。实现了溜放进路、驼峰联锁、间隔调速和目的调速等自动化功能。系统日均解体能力不小于6500辆,繁忙小时解体能力不小于350辆;允许平均推峰速度达7km/h;调车线内5km/h以下安全连挂率不小于90%;间隔制动位减速器控制误差平均值不超过±0.1km/h,均方差不超过0.6km/h,±1km/h误差范围内达到95%以上;目的制动位减速器控制误差平均值不超过±0.1km/h,均方差不超过0.5km/h,±1km/h误差范围内达到95%以上;全场集中操纵,直接操作人员不超过两人。

(1) 系统构成。TW-2系统采用上、下层集散式控制方式。下层针对系统控制范围和规模可选用不同种类和数量的硬件模块;上层针对不同驼峰场可采用不同的软件模块。系

统集成的主要功能模块包括驼峰头部联锁和线束调车联锁,溜放进路自动控制,一、二、三位减速器自动控制,股道空闲长度测量,平面单钩溜放等模块。系统各功能模块在上层管理机实现数据资源共享,实现了各个功能模块之间的有机结合。系统采用CAN控制局域网,以太网、多媒体操作界面、32位编程、386EX嵌入式控制器的专用硬件设计。系统可集成小到6股道以下无调速控制系统,多至32股道的综合自动化系统。其系统构成如图2.6-46所示。

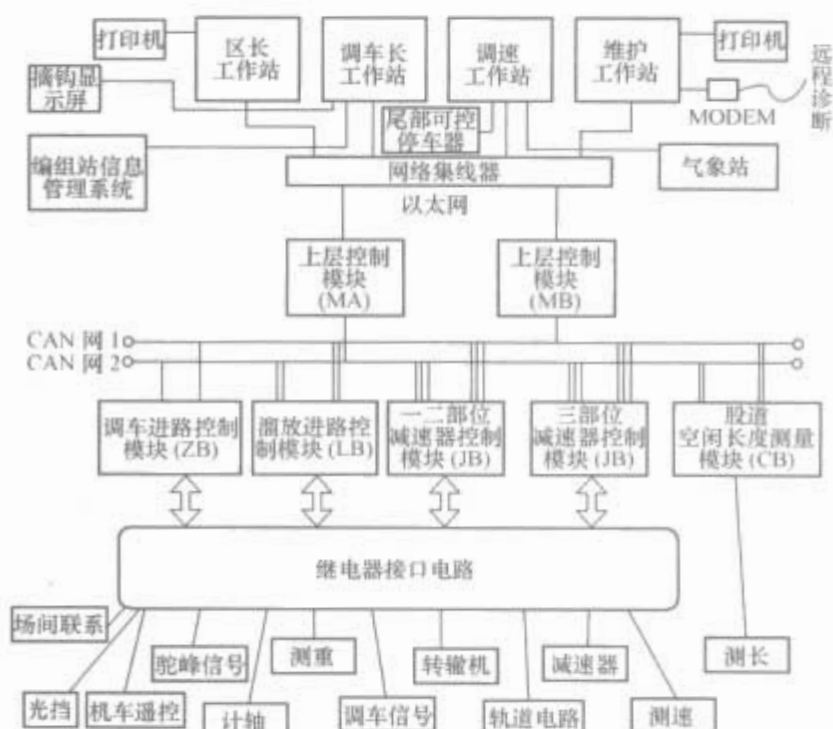


图 2.6-46 TW-2 驼峰自动化系统构成

(2) 系统特点与功能如下:

1) TW-2系统采用微机构成标准化、通用化、模块化、系列化,为控制级、管理级、操作级3级体系结构。级间采用网络通信,控制级为Intel80386EX专用嵌入式计算机,操作与管理级采用工业PC兼容计算机;按控制功能和范围设定了不同的自动化独立节点,故障不扩散。该结构体系使系统具有管理和控制一体化,风险分散,针对不同站场规模 and 不同功能需求组态灵活等优点。

2) 对途停、堵门、满线、摘错钩、错道、追钩、钓鱼、峰下摘钩、道岔恢复、打靶距离不足及轨道电路轻车跳动等溜放作业可能发生的特殊事件进行检测报警及防护。

3) 系统支持放头拦尾调速、股道自动封锁、调车线出岔防护、双峰“零等待”自动转换等功能。溜放初始时的推送进路自动选路与锁闭,并可自动建立与到达场的场间联系。

4) 可自动执行混合型的调车作业计划,除溜放钩外,可以按计划逐钩自动执行下峰整理调车进路、禁溜线和迂回线取送车进路,无需操作员介入。

5) 建立在数据库基础上的历史数据可分为永久性概要数据和按月更新的详细数据。系统可提供表格或图形统计分析报告,提供基于上述数据库的作业回放及事件归类及查阅功能,为故障分析提供完备的直观资料。系统支持通过公共电话网的远程诊断提取信息。

6) 系统具有完备的基础测量支撑,室外基础设备适应范围较宽,执行设备故障导向安全、故障弱化及降级处理功能,硬件模块插件可带电插拔等技术。

3.2.2.2 FTK-3 型系统

运用先进的计算机硬件、软件及网络技术简化了结构,扩充了功能,系统可以进行网络扩展。该系统采用双主机热备、双通信网结构方式,两套下层控制器分别与两台主机进

行通信。两套主机和下层 CPU 同时执行两套完全相同的程序,校核双机同步,实现双 CPU 的互相通信、监督。

系统具有驼峰调车进路自动控制、溜放进路自动控制、溜放速度自动控制、驼峰溜放信号自动控制及有关驼峰作业的其他控制功能,适用于不同类型站场配置、不同作业方式的驼峰站场。

(1) 系统构成。该系统由下列设备组成:

1) FTK-3 型系统型驼峰自动控制系统由控制主机、进路控制机箱、速度控制机箱、双机切换装置和多个工作站组成。

2) FTK-3 型系统在大中驼峰场设 3 个机柜, A、B 柜分别组成双套控制系统中的一套独立系统。C 柜为主机控制柜, A、B 控制柜中各有 2~4 个控制机箱, 即 1 个进路控制机箱和 1~3 个速度控制机箱。速度控制机箱负责控制全场的减速器和测长; 进路控制机箱负责全场的道岔控制、信号控制和场间联系。主机控制柜中放有 A、B 控制系统的两台主控计算机和机房工作站主机、双机切换装置、网络集线器等设备。

系统在中、小驼峰场设两个机柜, A、B 机柜是两套完全独立的控制接口柜, 每个接口柜设主机一套、控制机箱两个, 其中一个为调车进路和溜放进路控制机箱, 另一个机箱为速度和测长机箱。

3) 系统一般设有维护工作站、调车长工作站和速度监控工作站。工作站设置可以根据需要增加, 各种工作站通过以太网与两台系统主控计算机相联。控制系统所有信息采集均源于分线盘。

4) 系统硬件采用工业级以上产品, 功能化模块集中式结构, 同种类型控制板可以互换; 工作站数量可以根据需要设置, 各工作站具有统一功能, 可互换。

5) 系统采用符合国际标准的计算机网络协议。系统可与车站信息处理系统、电务微机检测网、移频, 或无线机车遥控系统、调车场尾部停车器系统、编尾计算机联锁系统、峰上提钩显示盘、MIS 系统通过国际标准网络或串行接口连接。FTK-3 型驼峰自动控制系统构成如图 2.6-47 所示。

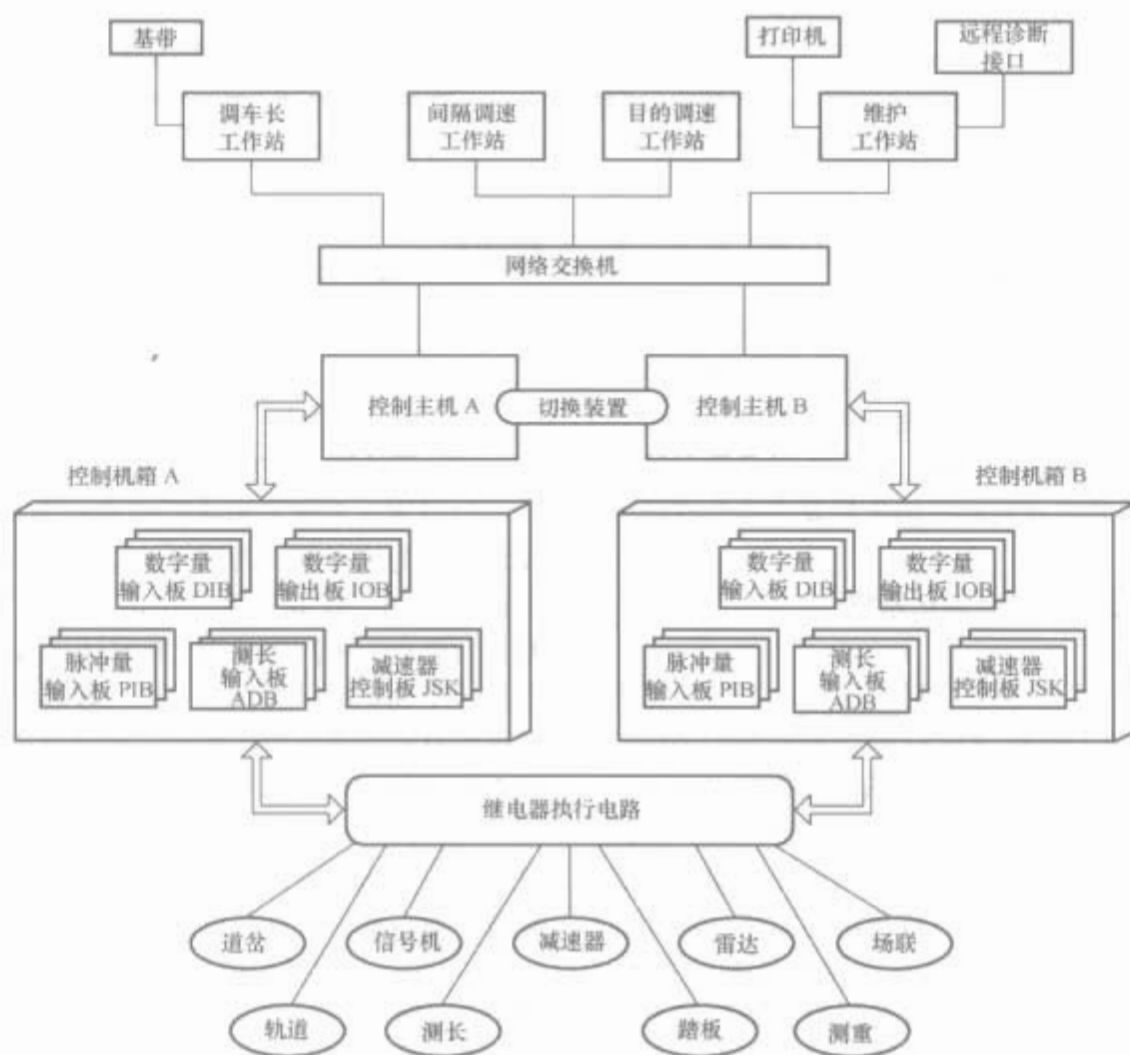


图 2.6-47 FTK-3 型驼峰自动控制系统构成

(2) 特点与功能。该系统有下列特点与功能:

1) 该系统适用于电气化和非电气化区段, 满足驼峰不间断作业要求。系统设备为全双套热备, 自动故障判别, 无控制断点切换; 系统可以单机运行, 同时对另一台计算机进行维护、检修及在线开发。系统具有按控制曲线、数据存储及长期存储功能, 利用数据库管理数据。

2) 驼峰调车进路自动控制。采用双套联锁软件并行比较的方式, 根据始终端选路方式或调车单信息建立进路。系统根据所选进路自动进行联锁关系的校核, 自动扳动道岔到预定位置, 选通进路, 锁闭道岔, 开放信号。

3) 溜放进路自动控制。根据调车单控制全场分路道岔自动排列溜放进路, 并自动处理追钩、错摘钩, 对堵门、满线、道岔恢复、道岔四开, 故障自动改道等异常作业。

4) 溜放速度自动控制包括间隔控制、目的控制、减速

器闭环自动控制、追钩处理及未跟踪车控制处理等。溜放信号自动控制可以与机车遥控系统联机运行。

5) 调车单管理包括调车单输入、存储及修改, 并与车站信息管理系统 (MIS) 或调车作业单传输机系统 (DCD) 联机运行, 自动接收调车单。系统具有窗口人机界面。

6) 站场图形显示及操作。动态显示站场图形、主机状态、设备状态、命令状态、溜放状态、速度控制数据并可进行鼠标操作, 动态显示各种信息及调车单, 调车长工作站能进行调车单操作、调车操作及溜放操作。

7) 检测及报警。自动记录设备动作时机及人工干预情况, 对重大作业或设备故障能响铃及关闭信号。系统采集周期可达 0.02s。

8) 维修工作站具有远程维修诊断功能、在线监测功能和回放功能, 重要数据及回放可选择永久保存。

9) 统计及修改控制参数功能。系统可自动统计道岔及减速器动作时间和减速器控制精度, 并为用户提供减速器控制参数、测长及减速顶调整系数功能; 过程记录的多种报告及速度控制过程曲线可灵活检索, 随时调出查阅、打印。

3.2.2.3 TYWK 型系统

系统可实现驼峰推送进路、调车进路的联锁控制和驼峰溜放进路, 以及溜放速度的自动控制, 适用于大、中、小型驼峰、机械化、自动化等不同控制制式和不同调速制式驼峰调车场的信号自动控制。

系统与其他系统的区别在于采用微电子智能模块替代传统的继电器控制电路, 实现对驼峰信号机、调车信号机、调车表示器、轨道电路、转辙机和车辆减速器的直接控制, 是我国首次实现铁路信号设备由电气信号向全电子信号控制转化的系统。

(1) 系统构成。系统由下列组成:

1) 系统硬件。系统采用集散式结构, 上层由两台主控机、维修工作站及显控工作站、速控工作站、储存工作站等操纵设备组成。两台主控机构成双机热备系统, 故障自动倒接和人为倒接两种方式, 倒接过程中不丢失数据, 不影响作

业。系统允许一台主控机在线, 另一台离线的工作方式。

2) 下层由控制现场设备的智能化控制模块群组成。主控机和各工作站及下层智能控制模块群间采用 CAN 现场总线方式, 构成局域网进行数据交换; 主控机经 I/O 开关量板与下层智能化控制模块 I/O 口连接, 输出控制指令。控制模块将 I/O 口的控制指令与 CAN 总线信息进行校核, 确定控制命令的正确性, 直接控制信号设备。

3) 系统软件采用模块化设计。主控机采用 Microsoft C5.1 编程、显控, 维修工作站采用 Visual C++ 6.0 编程, 下层模块采用汇编语言和 C 语言编程。主控机采用适于工业控制的 AMX86 实时多任务操作系统, 工作站采用 Windows 2000 操作系统; 软件设计遵从故障导向安全原则, 具有较大的冗余、容错及纠错能力, 以及在线诊断功能, 实现故障自动识别和定位。控制模块程序按模块化设计, 对开入、通信等信息实时巡测。用多次比较等方法对采集的信息进行异性判定和逻辑处理, 对输出反馈和信号机的工作状态进行实时监测, 发现异常及时报警, 并将输出置成安全状态。图 2.6-48 所示为 TYWK 型系统构成示意图。

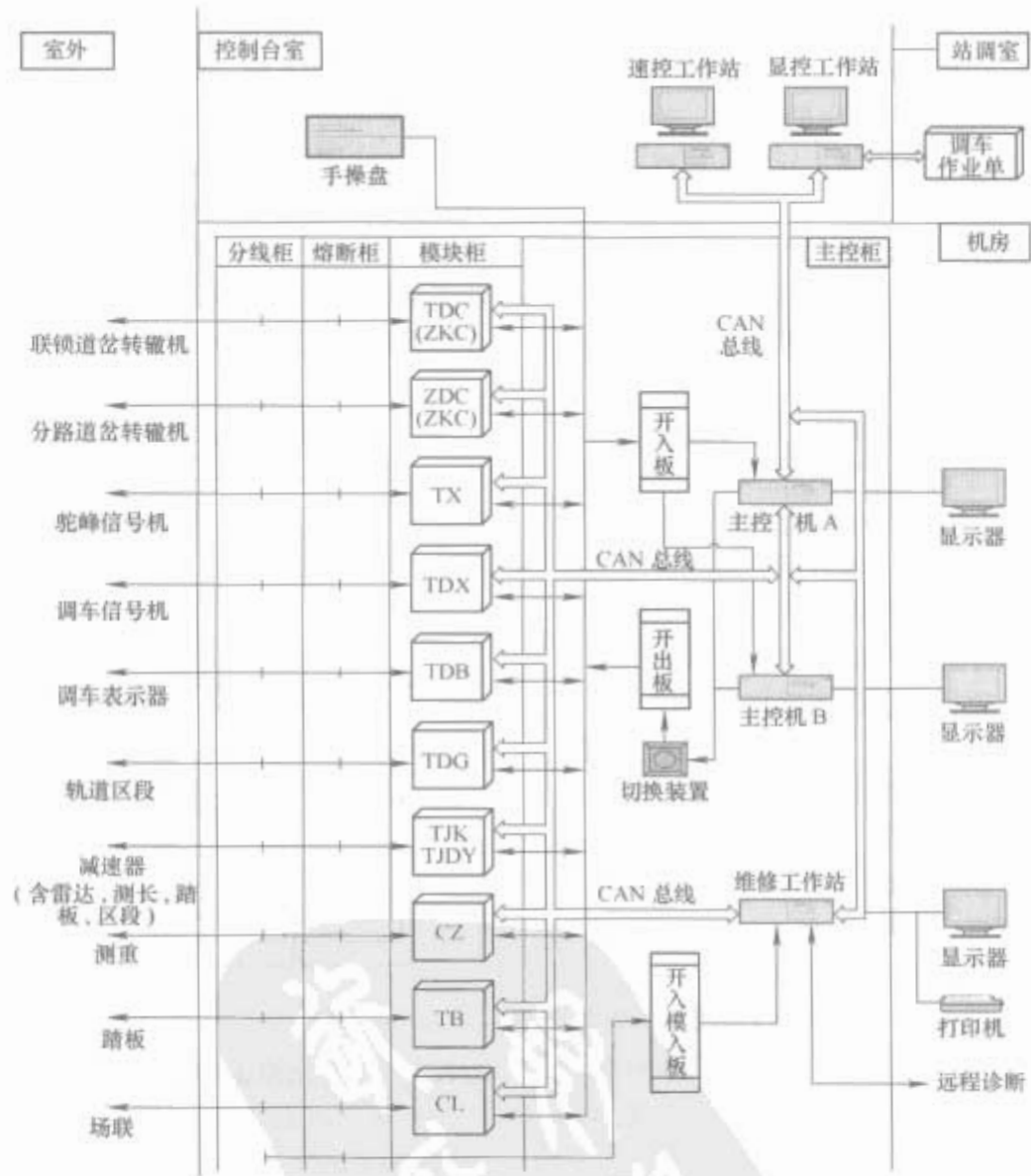


图 2.6-48 TYWK 型系统构成示意图

(2) 特点与功能。该系统有下列特点与功能:

1) 实现信号全电子控制。系统采用微电子智能控制模块替代现有计算机控制系统中仍延用的继电器执行电路和接口电路, 实现对信号机、转辙机、车辆减速器的直接控制和轨道电路占车状态的直接识别。

2) 一体化系统软硬件。该系统是一个标准的集散式控制系统, 既实现操作管理与控制执行电子一体化, 又做到智能模块高度分散, 避免了局部故障导致全场失控的恶性后

果。该系统可根据实际需要, 优化系统的软硬件配置, 组成适合大、中、小驼峰的自动化控制系统。

3) 联锁关系采用三级逻辑判定。用上、中、下位机串行逻辑判定方法替代传统多机并行比较的逻辑判定: 第 1 级由显控机根据站场作业模式、现场设备及进路状态判定作业人工键入命令的有效性; 第 2 级由主控机沿用传统的进路联锁方式, 对所接收的命令进行有异性判定及逻辑运算, 完成命令的下达。第 3 级由下层智能控制模块对该范围设备进行

综合判定,最终确定命令的执行,并将执行结果回示上层主机完成联锁处理。

4) 对作业全过程、系统控制全过程进行记录和储存,通过重放和查询数据,判断作业故障产生原因;根据记录、接收控制模块对现场信号机械设备的检测结果,判断设备的使用状态,实现超标报警、超前防范,保证设备运用质量始终处于受控状态。

5) 提高解体能力和速度控制精度。采用智能电子模块对驼峰分路道岔转辙机、信号机、减速器的直接控制和轨道电路占车状态的识别,缩短了控制命令的传递和控制电路的工作时间。其中对道岔转辙机的控制省去4台继电器的动作时间约0.5s,减速器控制缩短约0.2s。溜放进路控制缩短了前后钩车的最小允许溜放间隔,有利于提高推峰速度,提高驼峰解体能力,也有利于提高减速器的调速精度。

6) 工程设计简单。工程设计只须按照所设站场信号的设备数量和类型进行选型组合,配置以控制模块为基本单元集成通用的道岔控制机箱、信号控制机箱、轨道识别机箱、减速器控制机箱、开入开出和双机切换机箱等,再配线连通即可。将传统的信号继电电路设计简化为通用设备之间的配线。

7) 系统配置适应各种大型、中型和小型驼峰调车场,调车场选择配置时允许选择控制功能中的一种、多种或全部,允许控制功能分期投产或功能预留,分期开通或实施预留工程不会造成前期建设废弃。

8) 系统在进路控制中设有自动和手动方式,在减速器速度控制中设有自动、半自动和手动3种控制方式;系统可设计为单推单溜方式、双推单溜方式、双推双溜方式、半场解体(溜放)半场调车方式等作业方式。

9) 系统可与其运行有关的系统联网,如与编组站信息处理系统联机,获得调车作业通知单和回送解体作业结果;与编组站调度监督系统联机,获得编组线存车信息等;与装备任何型式的集中联锁系统的相邻车场联机,建立跨场的推送进路或调车进路;与驼峰机车信号系统联机,向其发送驼峰主信号机显示信息;与机车遥控系统联机,向其发送推送速度控制机车推送,并接收返回的机车实际推送速度。

3.2.2.4 TBZK 型系统

系统是针对编组站驼峰场作业过程而设计开发的计算机控制设备。系统将驼峰推峰机车控制、驼峰进路控制和驼峰溜放速度控制纳入计算机控制和管理,实现了驼峰作业自动化,已在全国三十多座站场推广应用。

(1) 系统构成。系统由下列设备组成:

1) 系统包含 TBZK-2 型驼峰计算机自动控制系统、JWT 型无线机车信号系统、TDWX-2000 (TY) 型驼峰微机监测设备、TGS 型驼峰峰顶提钩显示屏和驼峰工业电视监控设备。

2) 系统由驼峰自动控制系统、无线机车信号设备、驼峰微机监测设备、驼峰工业电视监控、驼峰峰顶提钩屏及测速雷达、测长、测重、车轮传感器、光挡、气象站等基础设备组成。

3) 控制系统设备分室内、室外两大部分。室内设备安装于计算机室和控制台室内。计算机室内设备主要包括控制机柜、无线机车信号地面设备、电务维护操作设备、测长与测重设备室内部分和驼峰监测设备。控制室设备主要包括驼峰控制台、车站值班人员操作作业机、彩色大屏幕站场模拟显示器和手动操作盘。室外基础设备设测速雷达、测长、测

重、车轮传感器、光挡、气象站、峰顶提钩屏、摄像头等。

(2) 特点与功能。系统特点与功能如下:

1) 计算机控制系统采用分散控制、集中管理模式—机车控制、进路控制和速度控制,每部分由各自独立的计算机完成。各控制部分采用双机热备冗余方式运行。

2) 控制计算机为 PC-104 “嵌入”式 CPU 模块,控制 I/O 接口采用面向对象的设计原则,分为道岔接口板、减速器接口板;设备操作采用 Windows-NT 界面、键盘及鼠标操作、CRT 显示,并设应急手动盘;采用惠普 (HP) 数据服务器,便于海量数据存储及访问。

3) 系统具有远程诊断接口,可用于设备故障及事故的异地分析;系统配有智能型测试台,方便现场维修及电路板检测。

4) 系统采用实时 Linux 操作系统,控制系统各计算机均具备双以太网卡,通过以太网交换机星型连接构成两个独立的控制子网实现网络容错。网络任何单点故障均不影响控制功能。系统内计算机间的通信基于 TCP/IP 协议,通过适当的连接方式 (RS232、RS485、RS422 等) 可与其他外部系统进行数据交换。

5) 应用软件设计按结构化程序技术设计,程序类型由顺序结构、分支结构和循环结构3种模式组成。

6) 系统由推峰机车无线遥控系统、溜放进路控制系统、调车进路控制系统、溜放速度控制系统及系统维护操作系统5个主要部分组成。其每一部分均可单独构成独立的控制系统;也可根据需要选择其中几部分构成小规模的驼峰作业过程自动控制系统;还可在原有设备的基础上增加所需环节构成标准编组站作业过程自动控制系统。系统的软件和硬件按功能结构设计,可按系统的规模组合选用。图 2.6-49 所示为计算机系统构成模块示意图。

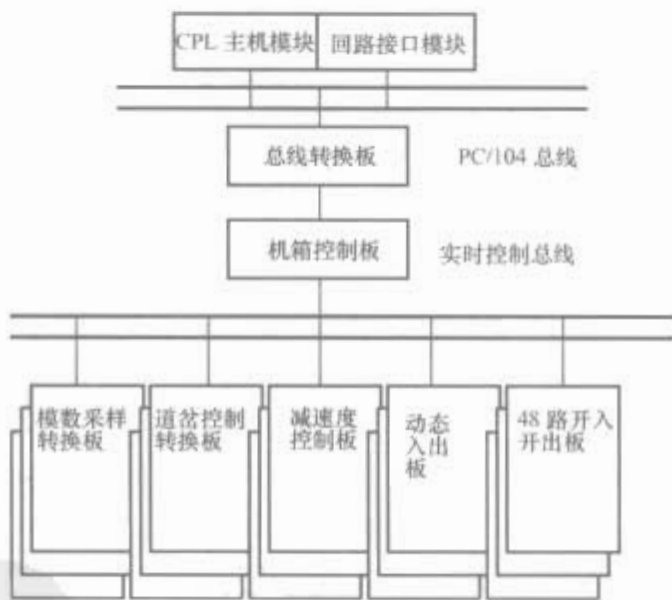


图 2.6-49 计算机系统构成模块示意图

3.2.3 成都北编组站综合自动化系统

新建于成都北的编组站综合集成自动化系统 (computer integrated process system, CIPS) 是我国自主创新的信息化与自动化的管控一体化系统。系统通过站内部横向集成隶属不同信息系统的数据库,实现站内的列、调车计划的自动生成与执行,并达到站内计划与控制的闭环互动;整合既有成熟的各过程控制子系统,建立共享信息平台。将调度计划与站内经路有关的部分下达至控制系统自动执行,并采用决策优化的方法,提供站内调车机、线路与走行径路等资源的合理分配与优化运用方案,实现调度决策指挥自动化。

编组站信息化实现编组站货物信息流、车辆信息流、机车与调机信息流、作业过程信息流的集成再造。CIPS 以流

程工业计算机集成过程系统理论为基础,以信息集成为核心,综合管理、生产、信息、自动化、系统工程等技术,实现控制、调度、管理、经营、决策与优化一体,构成智能闭环系统。通过调度计划管理,实现编组站决策优化、调度管理、控制一体化,以及编组站综合自动化的目标,发挥各分系统综合效益。以 CIPS 系统为平台,综合编组站业务的工作过程示意轮图如图 2.6-50 所示。

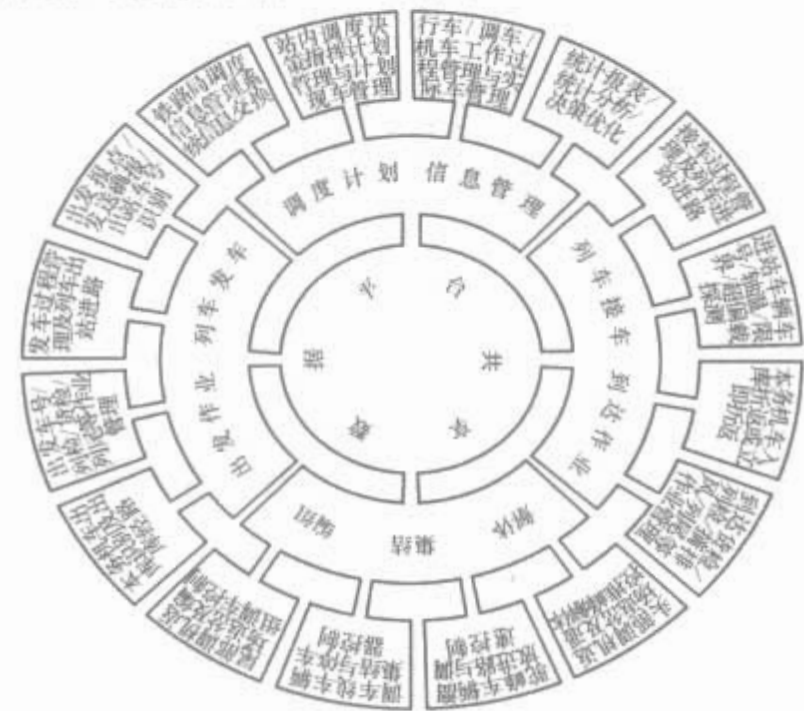


图 2.6-50 综合编组站业务的工作过程示意轮图

3.2.3.1 系统构成

CIPS 系统构成分为综合管理和综合控制两部分,其中综合管理系统负责编组站调度、管理与决策,其重点是车站调度计划信息管理自动化,执行过程管理自动化,历史数据管理。纳入系统集成并实施自动监控的系统设备主要包括联锁自动化分系统、驼峰自动化分系统、调机自动化分系统、停车器自动控制分系统、外业移动信息分系统、电务监测及环境监控分系统。图 2.6-51 所示为 CIPS 系统结构示意图。



图 2.6-51 CIPS 系统结构示意图

3.2.3.2 系统总体目标

(1) 调度计划自动执行。CIPS 的首要目标是将调度计划中与站内径路有关的部分直接下达给控制系统自动执行,即

以 CIPS 管理系统所编制的接发车计划、调车计划、本务机站内折返计划、调车机工作计划等为依据,产生并向联锁、驼峰、停车器等自动化分系统实时下达调度指令,实现进路自动办理,使编组站所有列车进路、调车进路、机车走行进路和溜放进路自动执行,实现作业过程控制全面自动化。

(2) 调度决策指挥自动化。采用决策优化方法,提供站内调车机、线路与走行径路等资源的合理分配与运用方案的优化,实现编组站班计划、阶段计划、车流推算、调车计划、本务机折返和调车机调度等计划的自动编制;闭环动态调整优化各类计划,实现调度决策指挥自动化。自动决策优化包括接发车场别与线别决策;解体顺序、编制解体计划及解体峰位决策;头部调机应用及调车线应用决策;编组顺序、编组调车计划编制;尾部机车应用决策;取送调车决策;出发车次改变;列车、调车、机车走行经路决策。

(3) 提高系统的利用率。通过调度计划的计算机辅助决策指挥,实现计划统一编制、动态调整及扁平化管理;计划直接下达至控制环节执行,取消正常情况下的人工介入控制。

(4) 集中监视。通过 CIPS 可用调度大厅屏幕直观展示站内全部工况,实现编组站到、解、集、编、发作业的集中监控与特殊操纵,取得单一指挥、统一办理、流水执行、高效运转的效果。

(5) 提高编组站效率,缩短车辆在编组站的作业周期。通过编组站整体闭环,优化调度,合理安排各工序间的衔接;加大自动化程度,取消人工计划布控、作业人员横向沟通协调及实况报告等通信联络;扩展调车机司机和作业人员的信息视野;利用车号、燃轴等检测信息预告服务于技术作业,提高编组站的整体作业效率,有效减少车辆在编组站的中转时间与停留时间,并降低站内平均结存车保有量。

(6) 充分利用信息资源。CIPS 的核心是数据整合、信息集成、车号识别、轴温探测、脱轨器表示、电务监测、环境监控、电源监测及图像监视等信息的集成与共享,提高作业预见性,使站内作业流程贯通顺畅。

3.2.3.3 编组站信息化再定位

CIPS 的重要特点是可实现编组站信息化的重构。根据总体目标,系统可对编组站信息化重新定位、规划、分析、设计与实施,构筑了编组站综合信息管理子系统。

(1) 调度计划综合管理。通常编组站调度计划包括站内接发列车、现车及调车、本务机折返、调车机、站内施工、货运等工作计划。为支撑 CIPS 管控一体、闭环监控的需要,系统对调度计划管理规定了以下约束条件:

1) 全面性。编组站运输生产流程上的环节,特别是与机车车辆运行和进路有关的计划必须纳入信息化管理范畴。

2) 一体化。编组站作业属于典型的流程类型,其作业性质紧密,除信息共享外,必须采取调度计划、编组站技术作业、编组站信息一体化管理的方法,随时处理各环节调度计划相互间的平衡、合理链接各工作程序。

3) 动态性。将人工铺排计划分时段编制、时段内执行或调度员口传通知调整改为计划动态、滚动调整。动态调整是在计划与执行互动基础上产生的即刻调节。引起动态调整的主要原因是计划变更及执行过程的偏差。计划的动态编制与调整必须建立在过程控制子系统自动反馈的基础上。动态调整采用自动化领域的过程调节与伺服原理,在计划与执行间形成智能闭环,即通过结果反馈动态调节调度计划,以适应后期执行的需要,使计划执行的兑现率达到 100%。动态计划需要自动决策与之配合。

4) 实时性。动态计划及计划的直接输出与执行要求计划的编制与调整,包括计划的决策、优化、调整与传输时间在内,必须限制在一定的时间范围内实时完成。

5) 自动化。编组站信息管理自动化可称为调度指挥自动化或计算机辅助调度。CIPS 定义的自动决策内容包括接发车场线决策,解体顺序、编制解体钩计划及解体峰位决策,头部调机应用、调车分类线应用决策,编组顺序、牵出线、编组钩计划编制、尾部机车应用决策,编制取送调车钩计划决策,出发列车接续关系决策和列车、调车、机车走行径路决策。

(2) 执行过程管理。该系统过程管理为全自动执行模式,基本不考虑人为介入。过程管理的功能与要点包括:

1) 调度计划与调度指令的自动触发。过程管理的作用主要是由计算机管理取代各个岗位值班员、信号员甚至其他作业人员的工作,即按照调度计划处理与监控其执行过程。调度人员管理计划通常以调度命令形式输出至过程控制子系统,其中与进路有关的输出类别有列车进路、调机进路、本务机进路、调车进路、溜放进路、停车器控制要求、驼峰股道封锁等;与进路无关的输出类别有列车预告、报点、发确报、车机联控、抄车号、车辆安全检测、技术作业通知与完成等。

上述调度指令的触发是过程管理的核心功能。通过对指令的触发管理决定调度计划正确执行的时机;通过指令的触发管理,裁决不同的计划在执行中争抢进路资源时的优先权。为实现触发管理智能化,站内各种机车车辆运行的调程计划与调程实际信息等必须达到管理信息的要求。

2) 执行结果反馈信息收集与过程信息动态展现处理。收集与管理过程控制系统的反馈信息、监督计划的执行过程是过程管理的重要功能之一。各过程子系统自产检测信息、独立的电务检测与环境监控信息的实时收集和管理也

在过程管理范围之列。过程管理的动态性强,为实现调度人员或执行人员对计划执行过程的监督,必须提供友好的图示界面。

3) 管理对象。CIPS 过程管理所管辖、服务的执行层子系统共约 11 个,包括联锁、驼峰、调机、尾部停车器、外勤移动信息、电务监测及环境监控等自动化子系统。对于直接参与控制的子系统,其管理模式分为自动、半自动、站控及维护等 4 种模式。

(3) 历史数据管理。计划信息管理、过程信息管理与历史信息管理是系统再定位的编组站信息化的三大支柱。其中历史信息管理即利用海量数据库技术保存所有的编组站作业中产生的计划与过程信息,并通过信息分析与挖掘提供如下服务:

1) 情景再现。通过回放操作控制再现调度大厅所有计划管理与过程管理的界面与操作,追溯调度计划与执行的动态过程。

2) 报表管理。按照规定及用户要求生成统计报表,并对统计进行分析,包括生产过程统计分析,全天候编组站各个环节的动态能力分析评估结果。

3) 统计分析。对生产过程进行统计分析,为车站或车务段对编组站的技术、人员、生产、资源管理提供依据,包括全天候编组站各个环节的动态能力分析的评估。

4) 决策参数优化。在统计分析的基础上,通过自学习与自适应,自动降低调度偏差,提高调度决策的质量及智能化水平。

5) 归档。实现编组站生产过程中运输资料的电子归档。

6) 电务信息与环境信息监测。提供编组站信号设备与检测档案管理与分析。

图 2.6-52 所示为成都北编组站 CIPS。

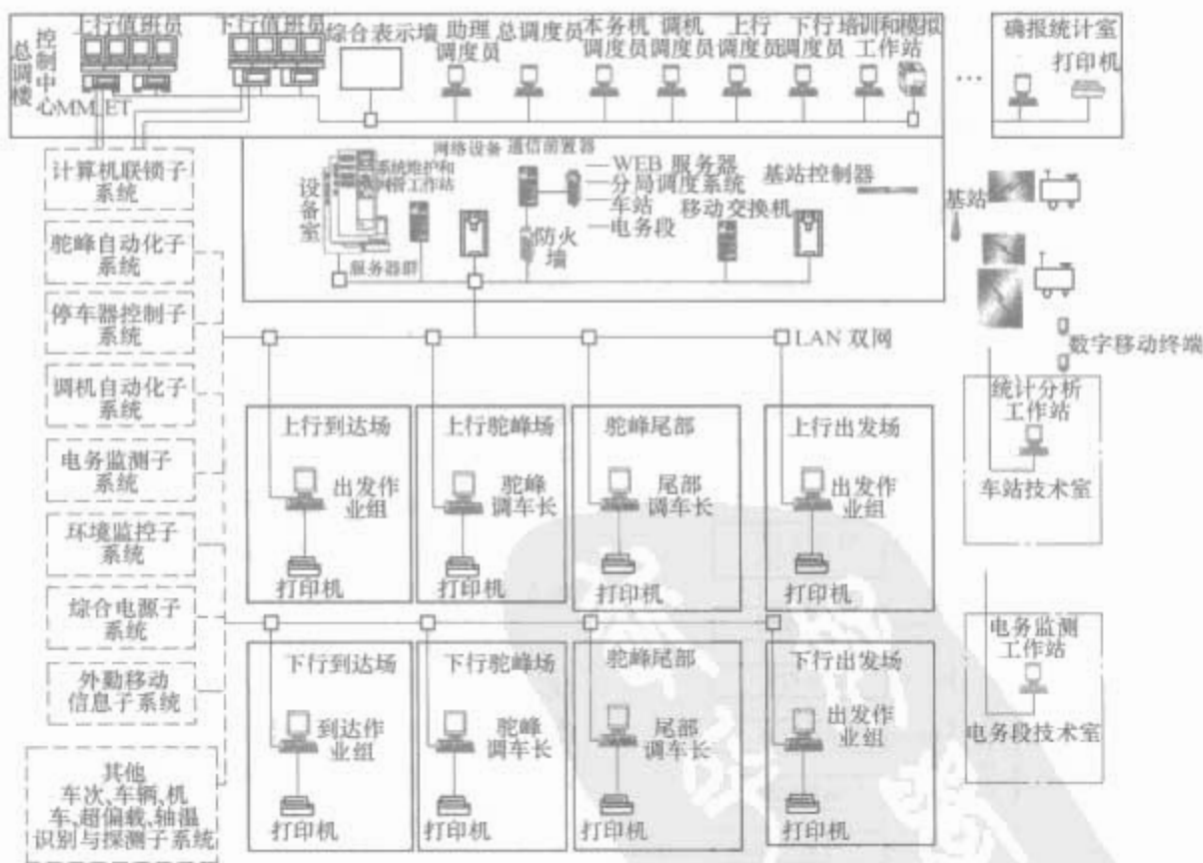


图 2.6-52 成都北编组站 CIPS

3.3 城市轨道交通信号系统

城市轨道交通信号系统主要由正线的列车自动控制系统 (ATC)、车辆段 (场) 列车自动监控系统分机和联锁系统构成。

3.3.1 列车自动控制系统 (ATC)

ATC 通常包括 3 个子系统,即 ATS,主要用于监督列车运行状态,实现行车指挥与列车运行管理自动化;ATP,其运用的主要目标是实现列车的间隔控制、超速防护和进路的安全监控,保证行车安全;ATO,主要完成站

间自动运行和车站定位停车,以及折返线的自动折返作业,并可接收控制中心的运行调整指令,实现列车运行自动调整,适应列车高速、高密度运行的需要。ATC系统与车辆段(场)的信号系统结合,实现列车出入段(场)的自动监控。3个子系统通过信息交换网络构成闭环系统,可充分发挥保证行车安全,提高运行效率,缩短行车间隔,促进管理现代化,提高综合运营能力和服务质量的作用。世界上最新技术的ATC系统是基于通信的列车控制系统,即CBTC-ATC系统。图2.6-53所示为ATC系统关系示意图。目前,我国尚不具备提供完整ATC系统的能力,可以配套的系统为基于数字化轨道电路/音频轨道电路的准移动闭塞ATP子系统和与之配套的联锁、ATS系统。

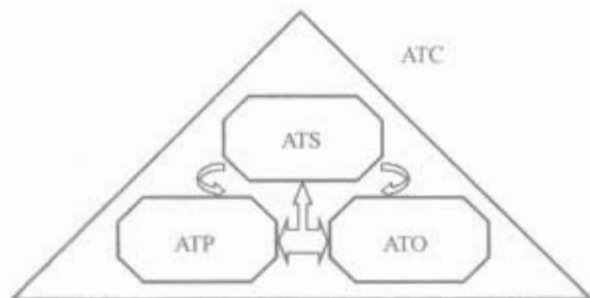


图 2.6-53 ATC 系统关系示意图

目前,ATC系统可有如下主要构成方式:

3.3.1.1 基于固定闭塞的ATC系统

该系统基于移频或音频轨道电路。车载控制设备根据接收到的不同低频信息所定义的限制速度,实施列车超速防护控制,如图2.6-54所示。列车在各个闭塞分区的运行速度分别限定在 $v_3/v_3 - v_3/v_2 - v_2/v_1 - v_1/0 - 0/0$ 速度范围之内,即一个固定闭塞分区只设一个限制速度。

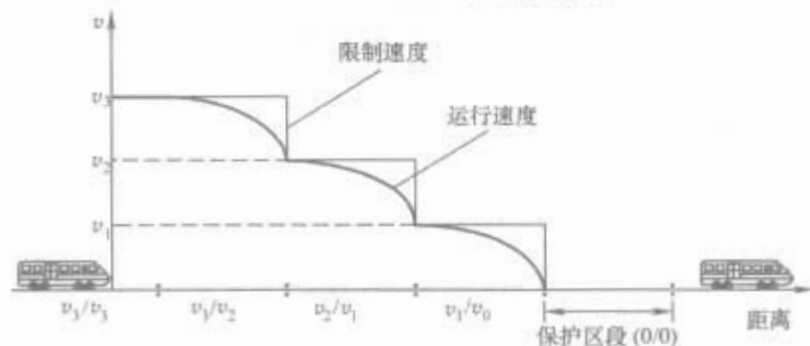


图 2.6-54 速度码控制的 ATP 系统

在该类系统中,闭塞分区的长度将根据运行的最长列车、满负载、最高速、最不利制动率等最不利条件设计。列车间隔为若干闭塞分区,而与列车在分区内的实际位置无关。列车位置的分辨率为一个闭塞分区,制动的起点和终点总是某一分区的边界,对列车的控制一般采用速度码台阶式制动曲线方式。该系统运行间隔越短,要求闭塞分区设备越多。

该系统从控制方式可分成在轨道电路的入口端控制和出口端控制。图2.6-54所示为出口端控制方式,是具有双红灯或防护区段的速度码控制的ATP系统。而入口控制方式不设双红灯或防护区段。

入口端控制方式则是列车在闭塞分区入口处接收到目标速度信号后,依此速度进行检查,一旦列车超过目标速度,则列控设备自动实施制动,使列车运行速度降至目标速度以下。

3.3.1.2 基于准移动闭塞的系统

通过编码式轨道电路、点式应答器等技术手段,向列车传输运行前方的目标距离、目标速度及线路状态等信息。ATP车载设备根据设定的速度-距离模式曲线监控列车安全运行。由于该监控模式仍设有一定长度的固定闭塞分区,

其控制模式与基于模拟轨道电路的台阶式制动曲线模式具有重大的技术差异,又不同于移动闭塞的列控制式,而定义为准移动闭塞系统。

速度-距离模式曲线是根据目标速度、线路参数、列车参数、制动性能等条件生成的反映列车允许速度与目标距离关系的曲线。列控系统根据速度-距离模式曲线实时监控列车实际速度,当列车实际速度超过当前允许速度时,设备自动实施常用制动或紧急制动,保证列车能在超速防护地点前实施超速防护或停车。该控制方式一般不设置防护区段,但应设安全防护距离。安全防护距离(safe protection distance)的定义是:当列车超速防护实施停车控制时,为防止停车位置离散性可能造成的危险,而设置自预定停车位置至目标地点的安全距离。图2.6-55所示为速度-距离控制模式示意图。

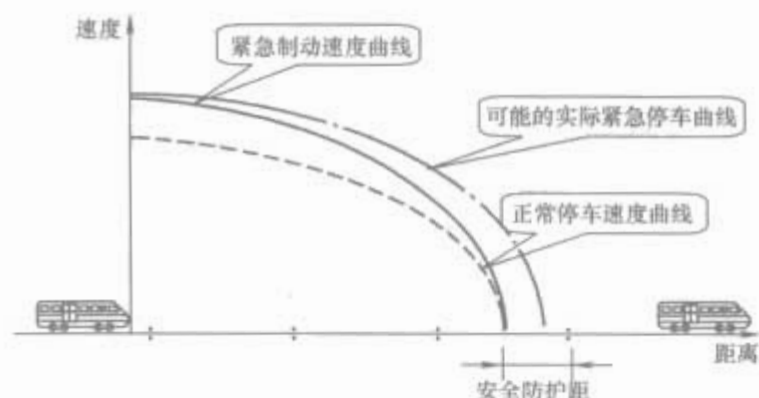


图 2.6-55 速度—距离控制模式示意图

该系统运行的线路被划分为预先设定的某一长度的闭塞分区,一个分区只能被一列车占用。闭塞分区的长度根据列车性能、行车间隔要求等因素确定。列车追踪间隔为若干闭塞分区,而与列车在分区内的实际位置无关。列车位置的分辨率也为一个闭塞分区,制动的起点可以延伸,但终点总是某一分区的边界。

距离-速度曲线模式一般通过音频编码轨道电路或模拟轨道电路结合电缆环线或应答器生成,也可以通过基于通信的列车控制系统CBTC实现。基于准移动闭塞的列控系统较之基于固定闭塞的列车系统具有较大的信息传输量和较强的抗干扰能力,增强了列车运行的舒适度,适应不同性能的列车在同一线路上运行,有利于提高线路的通过能力和节省能耗。

3.3.1.3 基于虚拟/逻辑闭塞的系统

虚拟/逻辑闭塞(virtual/logical block)通过计算机技术、通信技术和列车定位技术,以铁路既有的闭塞分区概念,将线路按行车间隔划分为非物理的、虚拟/逻辑闭塞分区或将原固定闭塞分区细分为若干个更短的、某一长度的虚拟/逻辑闭塞分区,以提高线路利用率,缩短行车间隔的技术方法。虚拟/逻辑闭塞制式的列车间隔为若干虚拟/逻辑闭塞分区,而与列车在虚拟/逻辑分区内的实际位置无关,列车位置的分辨率为一个虚拟/逻辑分区,制动的起点可以延伸,其终点为某一虚拟/逻辑分区的边界,对列车的控制一般采用连续速度-距离模式曲线方式。

虚拟/逻辑系统在既有基于轨道电路的固定闭塞基础上不改变既有闭塞分区的划分,增加必要的通信模块、定位信标和双向数据通信系统,即可达到缩短发车间隔,保证行车安全的目标。该系统分区数目的增减,所需设备基本不变。该种闭塞方式适用于既有固定闭塞区段提高运能的技术改造线路。

虚拟闭塞的设计允许多列车占用相同的物理轨道电路,而不允许列车占用同一“虚拟”闭塞分区。

3.3.1.4 基于移动闭塞的系统

移动闭塞可定义为前方列车与后续列车之间的最小安全追踪间隔距离单元不预先设定，并随列车的移动、速度的变化而变化的闭塞方式；或定义为连续检测列车的位置和速度，确保防止列车之间的冲突所必需的、可变的并能移动的闭塞区间。从上述定义可知，移动闭塞不预先设定闭塞分区，可实现列车按最小安全间隔追踪、闭塞分区随列车的移动而移动的一种闭塞方式。移动闭塞应实现连续检测列车的位置和速度。

移动闭塞系统与具有轨道电路的闭塞制式相比，列车运行间隔相对减少，具有更大的运用灵活性和运行调整能力。图 2.6-56 所示为移动闭塞系统常用的列车速度控制—追踪示意图。后续列车的控制原则以先行列车施以无穷大的减速度而骤然停车为前提条件。

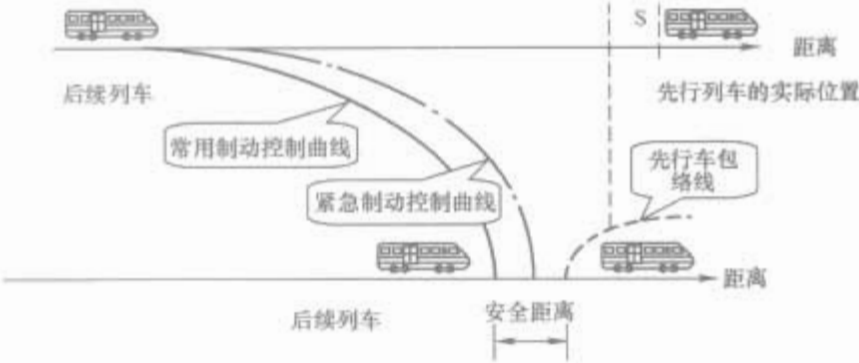


图 2.6-56 移动闭塞系统

3.3.1.5 基于 CBTC 的闭塞系统

(1) CBTC 系统的特点及基本构成。信号系统技术的最新变革是向基于通信的列车控制系统 CBTC 的演进。CBTC 系统不依靠轨道电路检测列车位置，以及向车载设备传递信息，而是通过车—地之间连续、双向、高速的通信实现列车、车站、控制中心的信息交换，结合综合列车定位技术和列车控制技术完成列车速度控制。

由 CBTC 系统实现地—车双向通信及列车位置的准确定位，从而突破了固定闭塞系统的局限性，为实现包括移动闭塞、虚拟/逻辑闭塞等在内的多种闭塞制式的信号系统成为可能。CBTC 系统可实时或定时实现高速和大信息量的车—地双向通信，向车载信号设备传递列车运行前方线路状况，后续列车可及时监督前方列车实际位置，给出最佳控制曲线。

CBTC 系统综合利用转速计、速度传感器、加速度计、定位信标检测设备及无线定位等技术，实现列车位置、走行距离、实际速度等精确测量。CBTC 系统车—地信息交换传输载体可采用环线、漏缆、波导管、自由空间波等方式。基于 CBTC 控制移动闭塞系统的组成和信息流程见图 2.6-57。

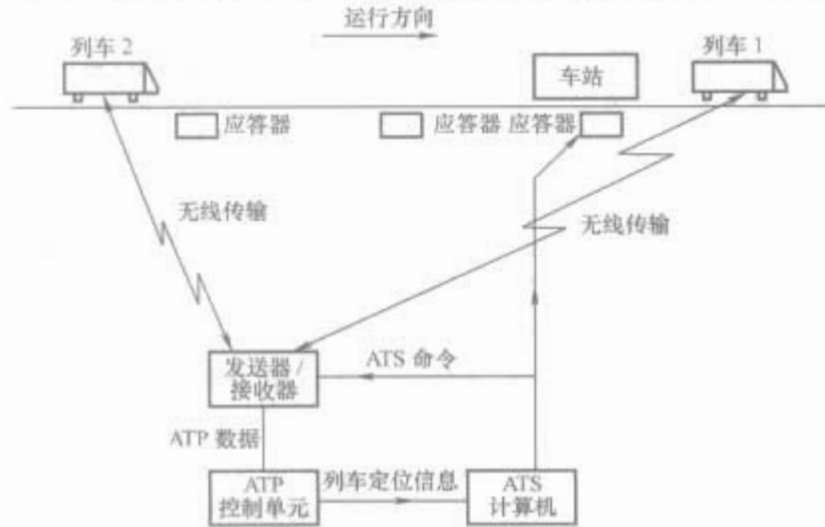


图 2.6-57 基于 CBTC 控制移动闭塞系统的组成和信息流程

根据 IEEE CBTC 标准，典型的 CBTC 系统结构框图如图 2.6-58 所示。CBTC 系统主要包括 CBTC 地面设备、数据通信网络和 CBTC 车载设备及与之相适配的联锁系统 CI、ATS 系统及 ATO 系统。地面设备和车载设备通过“数据通信网络”连接。



图 2.6-58 典型的 CBTC 系统结构框图

(2) CBTC 系统的无线通信技术标准。典型的 CBTC 系统具有大容量、高速、车—地双向移动通信的特性。采用基于无线通信技术及相应标准已成为 CBTC 系统技术的重要基础。

IEEE 802.11 系列标准的用途及特点见表 2.6-21。

表 2.6-21 IEEE 802.11 系统标准的用途及特点

标准名称	用途及特点
IEEE 802.11a	扩充无线局域网的物理层，使用 5GHz 频带。该标准采用正交频分复用（OFDM）调制数据，数据传输率范围为 6~54Mbit/s，适合于室内和室外的应用
IEEE 802.11b	扩充无线局域网的物理层，使用 2.4GHz ISM 频带。该标准采用补偿编码键控（CCK）调制数据，数据传输率范围为 1~11Mbit/s，适合于室内和室外的应用
IEEE 802.11d	IEEE 802.11b 使用其他频率的版本，采用非 2.4GHz ISM 频带的区域
IEEE 802.11e	改进和管理 WLAN 的服务质量 QoS，可在 IEEE 802.11 无线网络上传输语音、图像，可视会议、流动媒体传送，增强的安全应用及移动访问等
IEEE 802.11f	接入点内部协议，用于改善 IEEE 802.11 协议的切换机制，使用户能够在不同的交换分区或接入设备间漫游
IEEE 802.11g	采用 2.4GHz 频带、正交频分复用（OFDM）调制数据，数据传输率为 1~54Mbit/s，保持与 IEEE 802.11b 的兼容
IEEE 802.11h	IEEE 计划为欧洲开发的无线局域网标准，采用 5GHz 频带
IEEE 802.11i	增强 WLAN 的安全和鉴别机制，克服 IEEE 802.11 安全性方面的不足

从表 2.6-21 可知，确定无线传输制式方面的标准目前主要有 IEEE 802.11a、IEEE 802.11b 和 IEEE 802.11g 等 IEEE 802.11 系列。除 IEEE 802.11a 工作在 5.8GHz UNII 频段，其余的 IEEE 802.11、IEEE802.11b、IEEE802.11g 均工作在 2.4GHz ISM（工业、科学和医疗）频段，并且可向后兼容。

目前，我国城市轨道交通引进的 CBTC 系统均采用

IEEE 802.11 标准。不同公司采用的无线通信技术见表 2.6-22。

表 2.6-22 不同公司采用的无线通信技术

信号系统供货商	无线通信技术标准
西门子(SIEMENS)	IEEE 802.11b DSSS(直接序列扩频)无线电台
阿尔斯通(ALSTOM)	IEEE 802.11g OFDM 无线电台、漏缆、裂缝波导管
阿尔卡特(ALCATEL)	IEEE 802.11 FHSS(跳频扩频)无线电台
美国联合道岔与信号国际公司(USSD)	IEEE 802.11g OFDM 无线电台
加拿大庞巴迪公司(BOMBARDIER)	2.4GHz 无线电台、漏缆

3.3.2 ATS

ATS 系统是实现列车运行管理的实时监控系统，系统的构成与具体的线路规模、站场配置，行车指挥、列车运行模式相关，即 ATS 必须结合具体线路及运营特点构筑。但基于不同闭塞模式下的 ATC 系统，其 ATS 功能基本相同。

3.3.2.1 ATS 子系统分类

根据构成与功能执行模式，ATS 系统可主要分为中央集中控制型、中心监视/车站控制型及分散自律控制型等 3 种方式。

(1) 中央集中管理、集中控制型。ATS 控制计算机设在中心，通过控制中心系统完成运行图的管理、追踪、进路控制命令的输出、报表统计等主要功能。ATS 车站设备主要完成控制中心进路控制命令的执行及表示信息的回送，即实现行车指挥的集中管理与控制。控制中心系统设备与站、段分机以双工信道相连。该类技术成熟，造价相对低廉。其缺点是中央控制计算机、传输设备或信道发生故障，将影响全线列车正常运行；对中心计算机处理速度、容量、通道传输、系统冗余度要求较高；现场功能、设备要求简单。

(2) 中央集中管理、车站分散控制型。系统主控制计算机设在中心，中心计算机与各车站智能终端信道多以点至点方式相连，车站与车站间设有迂回信道、中心计算机监视和管理运行图。车站智能终端从中心计算机下载运行图完成行车指挥控制功能。当列车运行偏离运行计划需要中心调整时，可由中心计算机或人工介入控制，也可将调整计划下载至车站设备。在中心计算机故障情况下，车站计算机仍能按列车运行图计划完成行车控制。这种控制方式相对灵活、可靠、技术成熟；对中央计算机的要求低于集中方式，对车站设备要求相对较高。

(3) 分散自律控制型（简称 ADS）。ADS 是技术随计算机网络技术发展和光纤通信技术的发展而诞生。ADS 的最大特点是：系统的中心计算机与车站计算机处于同等地位，中心和车站计算机可在同一模式下各自独立运行，并协调监控全线列车。中心或车站系统故障除对辖区可能造成影响外，通常不会将故障范围扩大。通常，中心与车站单元均接入环形主干网。

3.3.2.2 ATS 子系统主要功能

ATS 子系统主要功能有：

- (1) 实现列车运行自动识别、自动追踪。

(2) 实现进路自动控制（根据计划运行图自动生成进路控制命令，设置列车进路）或人工控制。

- (3) 实现列车运行自动调整。

(4) 在人工辅助下，编制与管理列车运行图及时刻表，描绘列车计划和实际运行图。

(5) 正线列车运行监视及系统设备状态的监视、监测和报警。

(6) 实现车辆段内列车运行监视、进/出车辆段的列车信号机状态的监视，并通过网络系统与控制中心、相关站、段交换列车运行、车辆运用、乘务员管理等信息。

(7) 根据在线列车运行情况，在运行秩序紊乱及运行偏离时刻表时进行 ATC 运行等级的调整，以及车站停车时分等的调整。

(8) 具有系统调试仿真功能，保证投入运用前的系统完整测试。

(9) 调度员培训应具有列车运行模拟及操作的动态模拟及仿真。

- (10) 列车运行各种统计报表的生成。

(11) 各种状态信息、数据和操作信息的记录及回放功能。

- (12) 向乘客提供向导显示信息。

(13) 与 ATP/ATO、通信系统（含时钟、传输及无线系统）、SCADA 系统、BAS 系统、FAS 系统及信号维修中心交换信息或与综合自动化系统交换信息。

3.3.2.3 典型的 ATS 系统

我国城市轨道交通领域，国产 ATS 已得到广泛应用。在上海地铁 1 号线的 ATS 基础上，经对国内用户需求的分析，创建了适应于我国城市轨道交通运用需求的 ATS 系统，先后在北京地铁八通线、北京地铁 2 号线技术改造，上海地铁 3 号线、大连快轨 3 号线、长春轻轨、天津地铁 1 号线等工程应用。

(1) 子系统总体构成。ATS 是一种分布式计算机监控系统，其设备布置见表 2.6-23，表 2.6-24 为 ATS 子系统设备功能概要。

表 2.6-23 ATS 系统设备分布

分布地点	设备名称
控制中心	包括调度人员监控全线列车运行的计算机系统及其外部设备。主要有：调度员工作站；调度长工作站；时刻表工作站；计划员工作站；维护员工作站；显示驱动工作站；培训工作站；主/备 ATS 应用服务器；主/备 ATS 数据库服务器；主/备 ATS 通信前置机（FEP）；网络机柜（包含路由器、交换机等）；打印设备
设备集中站	包括与计算机联锁和 ATP/ATO 系统接口、管理车站范围内线路的必要设备以及控制发车计时器和乘客向导系统的设备。主要有：冗余的车站 ATS 应用和通信前置服务器；网络机柜（含路由器、HUB 等）；发车计时器（TDT）
非设备集中站	包括控制发车计时器和乘客向导的设备。主要有：网络机柜（含路由器、HUB 等）；车站控制器；发车计时器（TDT）
车辆段	车辆段（场），包含与计算机联锁、管理段（场）的设备以及 ATS 车辆段（场）工作站。主要有：派班室 ATS 工作站（可监视车场信号设备）；信号楼 ATS 工作站（可监视车场信号设备）；冗余的车站 ATS 应用和通信前置服务器；网络机柜（含路由器、HUB 等）

表 2.6-24 ATS 子系统设备功能概略

设 备	功 能
中心应用服务器	为 ATS 系统主要设备,负责全线时刻表管理、列车跟踪和进路控制等
数据库服务器	管理计划时刻表、实际时刻表和操作日志
调度员工作站	人工进路设置和时刻表在线修改,并通过人机接口功能输出列车跟踪数据
时刻表工作站	显示计划和实际运行图
调度长工作站	运营状态的监控
显示驱动工作站	输出列车位置、信号机/道岔状态至大屏幕显示器
打印机	打印操作日志、错误记录及实际时刻表
彩色打印机	打印时刻表显示终端的屏幕状态
维护工作站	系统加载和数据分析
网络机柜	传递中央与车站控制器之间的控制指令与状态数据
车站控制器	提供列车跟踪、进路设置以及与 ATP/ATO/CI 子系统交换数据等功能;当中央出现故障时,不间断地执行列车跟踪、进路设置自动执行等功能
车站通信处理机	将乘客向导信息和发车计时器数据发送至相应的设备
车辆段控制器	车辆段区域的列车跟踪
培训工作站	设备可供调度员培训和列车运行仿真

ATS 经通信系统提供的冗余网络将控制中心 (OCC) 子系统和车站子系统组成一个冗余的广域网结构。OCC 子系统采用网络交换机组成两套热备的中心局域网, OCC 设备通过 TCP/IP 协议连接至中心局域网,再经 OCC 路由器连接至通信系统与设备集中站连接成点对点的广域网。设备集中站子系统采用两个集线器组成热备车站局域网:设备集中站设备通过 TCP/IP 协议连接至设备集中站局域网,再经车站路由器连接至通信网络,与 OCC 和相邻设备集中站构成点对点主/备冗余广域网连接。车辆段 (段) 也采用集线器组成热备局域网,车辆段 (段) 的主要设备及信号楼 ATS 工作站均通过 TCP/IP 协议连接至车站局域网,派班室 ATS 工作站采用专用光纤 Modem 连接至车辆段/停车场的局域网。非设备集中站和设备集中站通过路由器和通信系统连接,以便 ATS 控制非设备集中站的发车计时器和乘客向导等。

图 2.6-59 所示为 ATS 系统构成图。

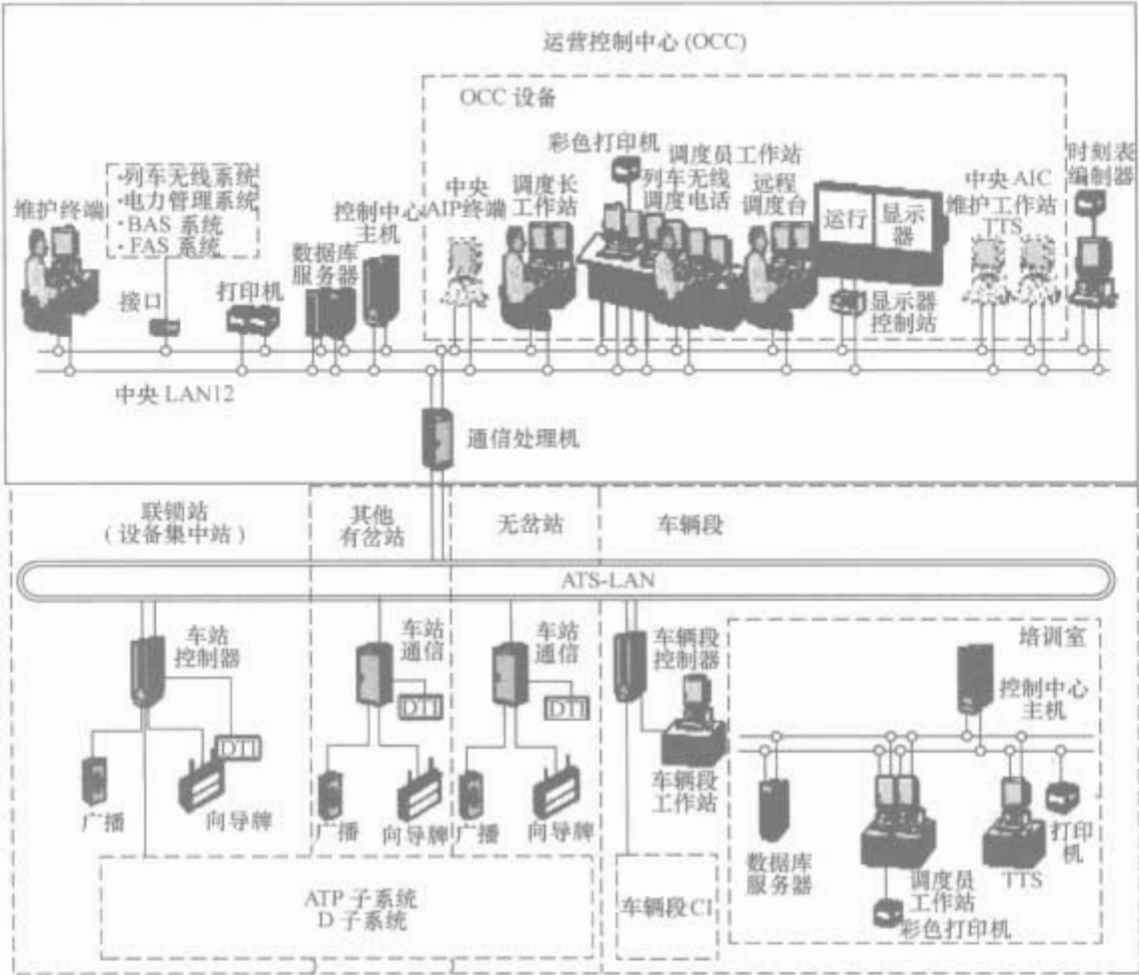


图 2.6-59 ATS 系统构成图

(2) ATS 子系统构成说明。

1) 控制中心子系统 (CATS)。OCC 采用两台网络交换机组成高速双局域网,通过中心路由器连接至通信系统,包括热备冗余应用服务器和热备冗余数据库服务器;多台调度员工作站根据划定的控制范围行使监控权。调度长工作站主要用于调度主任监督线路的运营情况。维护工作站用于监视记录全线信号设备运行状态、故障报警、重要事件等。计划员工作站用于时刻表的离线管理与维护。时刻表工作站用于显示计划/实际列车运行图。培训员工作站和培训服务器运行模拟系统用于调度员或维护人员培训。以上工作站均可以通过鼠标拖动显示线路的全景及运行图。

①操作控制模式。ATS 正常运营时,主要采用中心控制 (中控);在站控模式下,OCC 和车站均可申请中控,当得到对方确认后,车站控制模式可由站控转换为中心控制。

在中控状态下,OCC 的操作员可发送控制命令至计算机联锁 (CI) 系统,再通过 CI 控制现场信号设备。在中控状态下,可以实现按运行图调整运营的全自动模式至全人工模式。

在设备集中站可采用车站操作模式。在中控模式时,中心和车站均可申请站控。当得知对方确认后,该车站控制模式可由中控转换为站控。在站控模式时,设备集中站的值班员可使用控制现场信号设备。

在紧急情况下,车站值班员可直接在 CI 的 MMI 选择紧急站控,不必通过中心授权,车站控制模式直接转换为站控。当联锁机故障时,所有的正线车站均采用现地控制盘进行扣车、提前发车和紧急关闭/取消紧急关闭操作。

②CATS 主要功能包括信号设备的状态显示,轨旁信号设备的远程自动及人工控制功能,站台相关的控制和显示功

能,列车信息的追踪和管理,运行图的编制和在线修改功能,列车的运营调整,告警和事件的管理,各种统计报表的管理,模拟显示屏的显示控制,系统的时钟同步功能,历史数据的记录和回放,培训功能,用户的权限管理,系统的远程诊断功能,系统的网络管理,图形化的操作员界面,实现与无线系统、时钟系统等外部系统的标准、安全、开放的接口。部分功能描述如下:

a. 列车描述功能。该功能通过处理 CI 发送的数据,对运行列车的位置及列车识别号数据进行汇总。通过动态刷新站场模拟图的方式,将列车运行信息以图形方式显示。在操作员工作站的彩色显示屏上实时显示站场模拟图,并在全线模拟显示屏上显示。列车描述模拟图根据 CATS 获得的站场数据更新,将相关实时信息提供给线路操作员,监控列车的运行。

b. 自动进路设置 (ARS)。该功能允许设置自动进路:根据列车的行车计划办理进路,即按照时刻表中定义的时间办理列车从计划折返站的折返轨发车进路;根据预设车次号及车次号软件跟踪列车,为列车办理进路;此外,在 ARS 下,操作员可为非计划列车或处理紧急事件随机办理人工控制进路。

c. 时刻表/运行图的管理与编辑。运行图定义了在日常运营条件下列车的运营计划。系统可提供 10 种以上的的基本运行图。用户可选择其一作为工作日、周六、周日或假日时使用的时刻表。操作人员可以用时刻表编辑工具,以在线或离线方式管理时刻表。

d. 离线管理。通过图形用户界面的时刻表编辑工具,建立和修改时刻表。

e. 在线管理。可以通过时刻表工具监控列车按计划行车,并通过加车、减车,修改站停时间和运行等级等方式调整和修改列车运行计划。

f. 运营调整。按照当日计划运行图调整列车运行:列车的运行时间应与运行图中定义的列车运行时间相一致,以此时间作为列车正常运行的依据。当列车停站时,系统自动判断列车的早晚点状态,通过计算给出合理的发车时间和运行至下站的区间运行时间,将发车指示通过站台发车计时器传达给列车司机,并将区间运行时间发送至 ATO。如果列车运行状况与计划偏离较小,ATS 的自动调整功能通过调整列车的站停时间、区间运行时分纠正列车运行偏离;如果列车运行状况与计划偏离较大,超出调整范围,ATS 的运行调整功能可为操作员提供人工介入的手段,调整和修改列车运行计划,尽快恢复列车按计划行车。

g. 线路监督和报警控制。监督线路信号设备及列车运营的当前状态,并管理系统的报警信息及确认处理。

h. 人工控制。当线路出现非计划列车、系统降级或紧急事件发生时,该功能允许操作员人工控制进路、特殊开放或关闭信号、指定站台扣车或提前发车、指定站台跳停、修改列车识别号等操作,实现系统运营的人工干预。

i. 乘客向导信息。ATS 提供与乘客向导显示盘接口,其信息传输采用电子工业协会 EIA 的标准接口方式。ATS 根据使用的当日计划运行图和列车实际运行信息,向车站乘客向导盘实时提供预测的计划列车到达信息和其他行车信息。上述信息根据当日计划运行图和列车实际的到发点而更新。CATS 将信息传送至车站乘客向导表示盘。

j. 数据管理。CATS 将收到的现场设备信息和列车运行信息经应用服务器处理,生成运营报告或统计报告。各类报告可在工作站以文本方式查阅,也可以自动或按要求通过

CATS 的报告打印机打印。系统可根据用户要求添加新的运营统计报告,其主要报告包括命令报告、报警报告、偏离报告、列车走行记录等。报警的记录取决于磁盘的容量,其标准做法为一周保存一次。根据需要可将上述数据转存至与维护工作站连接的外设 CD-ROM 或其他磁盘。

k. 回放。ATS 支持历史数据的记录和回放功能。CATS 记录各种相关报警和事件包括来自 CI 和 ATO 的信息。回放功能可在任一工作站操作实现,而不对在线服务器有任何影响。

l. 模拟显示屏的管理。CATS 提供与模拟显示屏的接口,向模拟显示屏控制器发送有关轨旁信号设备状态、列车描述的信息,以及路线、车辆段(场)及电力遥控 SCADA、防灾报警系统 FAS 和主时钟等系统的信息。

2) 设备集中站 ATS 系统 LATS。LATS 采用冗余工业控制计算机作为车站分机,用以实现 LATS 和 CI、OCC 和 LATS 之间交换信息的通信平台任务。LATS 的主要功能为:

①接收来自 CI 的信号设备变化信息,并转发至 OCC,由应用服务器处理后,在工作站上以图形的方式显示。

②接收 OCC 下达的控制命令,并转发给 CI 执行。

③根据当日计划运行图、列车识别号、列车位置和当前时间,自动办理进路。

④当中心故障时,由车站完成列车识别号跟踪和自动办理进路。

⑤控制发车计时器显示。

3) 非设备集中站 ATS 设备。非设备集中站 ATS 设备主要完成的功能为监督本站和相邻车站的状态;在站控模式下实现对该车站站台相关的人工控制功能;控制发车指示器显示,具体显示情况同设备集中站;向旅客向导系统发送来自中心的列车信息,具体信息同设备集中站;向车站广播系统提供列车接近信息,作为自动广播预报列车到达的触发信号;采集智能电源屏的维护信息。

4) 车辆段 ATS 设备。ATS 在车辆段设置冗余的 LATS 设备,其部分功能与设备集中站 LATS 设备一致,实现与联锁系统的信息交换。在车辆段信号楼值班室和派班室各设置一台 ATS 工作站,实现列车进路和乘务员的调度管理。车辆段 ATS 的主要功能包括车辆段轨道电路显示,车辆段进段与出段信号机显示,以及列车识别号的自动跟踪;操作员通过专用的 MMI 设置取得有关列车和司机数据;显示当前使用的时刻表和计划列车的出入库信息;信号设备的故障报警分类和查阅。

3.3.2.4 系统运用模式

ATS 定义了 4 种不同的运行调整模式。

(1) 全自动调整模式。该模式系统为 ATS 自动程度最高的模式,ATS 实现计算机辅助调整和调度的全部功能。ATS 根据当日的实施时刻表和列车早晚点状态自动调整列车站停时间和区间运行等级;由 ATS 根据当日的实施时刻表自动在转换轨和计划折返轨处,为列车赋予目的地和车次号。

(2) 非自动调整模式。该模式为 ATS 的一种降级模式。ATS 按照当日实施时刻表所定义的列车停站时间和区间运行等级控制列车;由 ATS 系统根据当日的实施时刻表自动在转换轨和计划折返轨处为列车赋予目的地和车次号;此时,系统的按图调整功能关闭,实施计算机辅助调度功能。

(3) 人工调度模式 1。该模式为 ATS 的一种降级模式。系统按照当日实施时刻表的列车停站时间和区间运行等级控

制列车运行：由控制中心的操作员人工在转换轨和计划折返轨给列车赋予车次号和目的地号。

(4) 人工调度模式 2。此时，ATS 不再根据任何时刻表信息控制列车的运行，由控制中心的操作员人工办理进路，调度列车运行。此为 ATS 的最低运用功能降级模式。

3.3.2.5 ATS 软件

- (1) 操作系统软件。
 - 1) Windows 操作系统。调度员工作站、调度长工作站、运行图显示工作站、计划员工作站、系统维护工作站、培训工作站、通信前置机、车辆段终端等采用 Windows 中文版操作系统，应用服务器、数据库服务器及培训服务器均采用 Windows Server 中文版操作系统。
 - 2) Linux 操作系统。车站 ATS 分机均采用 Linux 操作系统。
 - 3) ORACLE 数据库。该数据库服务器端安装于控制中心应用服务器、数据库服务器及培训服务器中。

- (2) 开发软件工具。
 - 1) Visual C++ 6.0 开发工具用于应用程序的开发和调试。
 - 2) ClearCase/Clearquest 进行开发过程中的软件质量管理。
 - (3) 应用软件。应用软件主要包括 ATS 中央服务器应用软件，ATS 数据库服务器应用软件，ATS 培训、仿真服务器的应用软件，ATS 控制中心各调度工作站的应用软件，ATS 控制中心运行图显示工作站应用软件，ATS 通信前置机的应用软件，ATS 控制中心回放应用软件，ATS 控制中心维护、网络管理工作站应用软件，ATS 运行图离线编辑应用软件，ATS 设备集中站分机应用软件，ATS 非设备集中站车站控制器应用软件，ATS 车辆段工作站应用软件，ATS 车辆段车站分机应用软件等。

3.3.3 列车自动防护子系统 (ATP)

ATP 子系统作为 ATC 系统的安全核心，负责列车运行安全间隔、超速防护、进路等控制及车门及站台屏蔽/安全门的安全监控。ATP 系统主要包括正线联锁、车载和地面设备等。

ATP 系统通过列车检测、列车间隔控制和联锁等设置的功能，实现列车冲突、超速等的安全防护。

3.3.3.1 ATP 系统主要功能

ATP 系统是保证列车运行安全的系统，其系统功能包括列车进路联锁控制，列车定位，列车安全间隔控制，列车测速及超速防护控制，列车倒退运行防护，轨道端头列车运行防护，列车编组区分的防护，列车零速度检测，轮径磨损补偿，列车门的联控，列车紧急制动，列车实际运行速度、列车限速、目标速度、目标距离等信息的显示，列车超速、设备故障等报警，列车运行状态、设备状态、驾驶模式等信息的显示及记录，系统自检和自诊断。

3.3.3.2 典型的 ATP 系统

以列车运行安全控制为功能目的的 ATP 系统，由列车位置检测及列控信息传输设备、联锁设备、车载设备组成。ATP 系统标准构成示意图如图 2.6-60 所示。

3.3.3.3 DTC 轨道电路

(1) DTC 轨道电路的构成。DTC 主要由通信板、发送板、地面接收、匹配器、调谐盒和调制功放等单元组成。图 2.6-61 所示为 DTC 数字无绝缘轨道构成示意图。

通信板接收区域控制中心发出的列控命令将数据解包后，分送给 DTC 轨道电路的发送、接收设备，发送板根据通信板

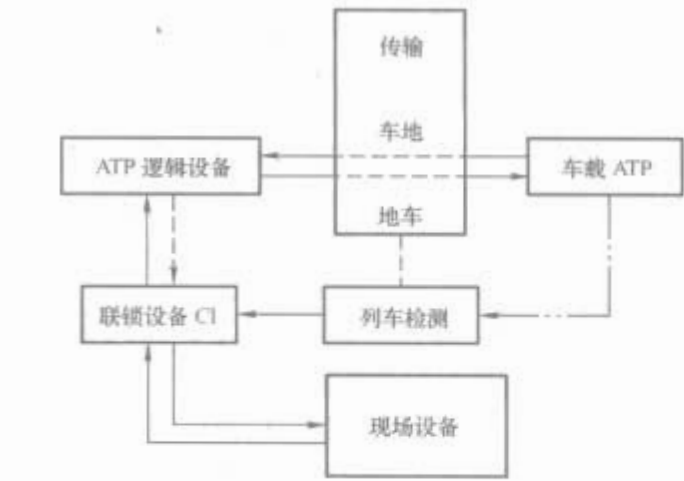


图 2.6-60 ATP 系统标准构成示意图



图 2.6-61 DTC 数字无绝缘轨道构成示意图

送来的列控命令形成 DTC 信息，调制后送至功放，经传输设备、钢轨回送至接收板。接收板对信号解调并判断轨道电路区段是否有列车占用，将此信息报告给通信板；通信将轨道电路状态报告给区控中心。同时，为了使区控中心及时了解 DTC 设备的工作情况，各单元设备将自身的工作状态报告给通信板，由通信板将数据打包发送给区控中心，列车通过安装在车辆第一轮对前方的传感器接收 DTC 的信息。

DTC 采用谐振式电气隔离方式。设备集中设于机械室，信号经电缆传送至钢轨。DTC 与区域控制中心的接口采用数字方式，信息编码及轨道区段列车占用/空闲检测均为无接点方式。如图 2.6-62 所示，区域控制中心 (ICU) 与 DTC 之间的信息交换通过现场总线 CAN 实现，DTC 与车载系统之间的信息传递通过钢轨线路和车载传感器的配合完成。

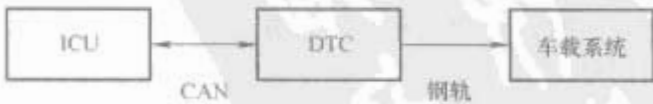


图 2.6-62 DTC 数字无绝缘轨道电路功能示意图

(2) DTC 的主要单元。

1) 通信板 (TU)。通信板用于 ATP 区域控制中心 (区控中心) 和 DTC 通信的中继。通信板通过 CAN 总线接收 ATP 区控中心发送来的数据，经数据分包后发向各轨道电路；同时接收各轨道电路的状态信息，编码后发送给区控中心。区控中心最多配置 10 个通信机柜，一个通信机柜包括热备两个通信板和 8 个 (最多) DTC 机笼。通信机柜和区控中心通过 CAN 总线通信，CAN 总线为双冗余结构，主备

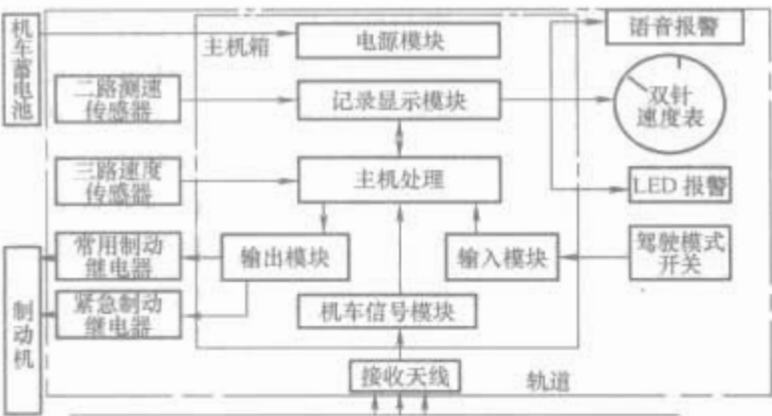


图 2.6-66 LCF-100 (DT) 型车载设备双机结构

2) LCF-100 (DT) 型车载设备主机包括如下模块：

- ①电源模块。电源输入为列车电源直流 DC110V；输出电源为一路直流 5V (25W) 供系统用；一路直流 24V (25W) 供机车信号用；一路直流 15V (2W) 供系统双套切换和动态用，与系统 5V 共地；5 路独立直流 15V (各 100mA)，供测速传感器用。
- ②机车信号模块。车载设备中机车信号模块采用通用的数字机车信号，可与超速防护组合使用，也可单独运用。在 LCF-100 (DT) 车载设备中，此模块作为超速防护车载设备的一块插板，由电源模块向其提供 24V 电源。
- ③主机处理模块。主机处理模块是整个超速防护车载设备的核心，用于实时检测列车实际速度和限制速度，完成设备的时间设置和轮径补偿处理，并根据列车驾驶模式、运行状态等运行条件确定系统的制动、缓解控制工况。
- 超速防护要求测速系统具有较高的测速精度和可用性，即使系统部分故障，也要求列车有速度指示。设备的测速通道采用冗余结构，即双套测速系统。一套采用光电 DF16 型测速传感器（三路输出），由设备主处理模块计算处理；另一套采用 DF8 型测速传感器（两路输出），由记录板计算处理。由设备主处理模块负责比较得出 ATP 车载设备所需的列车实际运行速度。速度传感器的输出信号均为 200 个脉冲/r，在 0r/min (0~3km/h) 时，仍可以在 100ms 速度采样周期内输出 0~64 个脉冲。为达到高精度的测速要求，此设备测速部分采用频率周期 (FT) 法测量传感器的输出频率。
- ④输入模块。输入信息均通过光电隔离采集，保证采集电路不影响信息源侧电路的正常工作。输入信息包括通用机车信号 13 个信息，均为 24V；模式开关状态 RM、CM、EUM，均为 110V；司控开关状态牵引、电制动、紧急、常用 4 个 110V 或 24V 信号；三路 110V 或 24V 信号输入的备用。
- ⑤输出模块。输出板按照故障—安全原则设计，由主机板提供动态输出条件，完成制动输出指令的执行、重要信息的输出显示及各继电器输出条件的反馈。其输出信息包括 4 路固态继电器的输出（地铁为常用、紧急、车门；内燃机车为常用三路、紧急；电力机车为两路常用）；两路并联常闭接点的继电器输出（内燃机为卸载和降转速，电力机车为紧急）；7 路 24V 信号的输出（地铁为无显控器下的司机面板显示）；8 路信息的反馈为 4 路固态继电器的输出，两路常闭继电器的输出，动态信息的反馈。
- ⑥记录处理模块。记录处理模块的功能主要是设置系统参数、修改系统时钟、独立测速、与主机间的通信、记录系统关键事件的发生和通过 IC 卡进行记录信息的转储。完成与主机间的通信，以设置车组号、系统时钟、列车轮径、设备装置号等；记录系统自检结果、设备故障和列车运行信

- 息；可将所记录数据通过 IC 卡转储至 IC 卡；当主机正常时，该模块输出主机比较判断后的实速和限速；当主机故障时，该模块输出自己测速结果驱动双针表的绿针，即实际速度的显示；与显示、键盘接口可以通过键盘输入或修改系统参数，并可以显示主要信息，便于调试，以后如需显控器，该部分挂上即可；机车信号变化、设备故障、车站扣车、限速提示和停车等情况下的语音报警提示。
- ⑦模式开关。列车超速防护车载设备的驾驶模式开关为安装于驾驶台上的一组电流为 1A 的 7 层 4 位切换开关。驾驶模式有限速模式 RM、ATP 模式和紧急非限模式 EUM 三种，其中 RM 和 CM 为常用模式，EUM 模式平时为禁用模式。
- ⑧测速传感器。车载设备设计采用光电结构的 DF16 型传感器和 DF8 型传感器，可有相互独立的 0~4 路输出。该传感器可安装于车辆轴箱盖，用于测量机车速度、空转和滑行，其输出为方波信号，其中一路供主机，另一路供记录板用。
- ⑨双针速度表。系统采用 EGS 型双针速度表，外针（红针）指示限制速度，内针（绿针）指示实际速度。
- ⑩IC 卡和读卡器。系统采用 4MB 位 AT45D041 型 IC 卡进行数据的转储。转储后，通过地面的读卡器将记录数据转储至 PC 机。该 IC 卡采用串行接口，页程序操作方式，具有单周期的重编程功能（擦除和编程）和 2048 个主存储页面，每页为 264 Bytes；具有两个 264Bytes 数据缓冲区，能够在接收数据的同时，对非易失性存储页面进行重新编程；具有内部编程和控制定时器；能够快速 (7ms) 进行页面编程、快速 (80μs) 实现页面数据向任一个数据缓冲区的传送。
- (2) FZL 列车超速防护车载设备。该车载设备是基于数字式无绝缘轨道电路，采用一次速度—距离曲线制动模式的 ATP 系统车载设备，适用于基于准移动闭塞的 ATC 系统。
- 1) 系统构成。FZL 准移动闭塞超速防护车载系统采用“三取二”的主机结构形式，主要由车载主机系统、人机接口、测速传感器及 ATP 天线等 4 个相对独立的环节组成。图 2.6-67 所示为 FZL 系统车载 ATP 设备构成示意图。车载设备主机安装在司机室电气设备控制柜中；人机接口设备 MMI 安装于司机操控台；测速传感器安装在不同转向架上，位于车辆的两侧；ATP 天线安装在列车的第一轮对的前方。

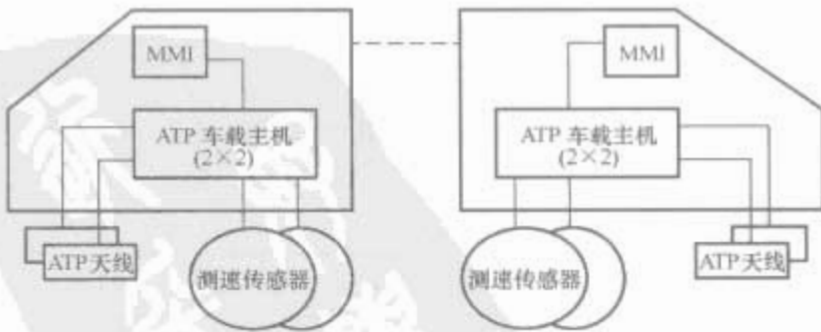


图 2.6-67 FZL 系统车载 ATP 设备构成示意图

- FZL 车载 ATP 设备采用开放式体系结构、模块化设计，预留列车自动驾驶 (ATO) 接口；根据车—地信息传输方式，增加相应的信息处理模块即可实现基于轨道电缆或无线传输的 ATP 系统。
- 该 ATP 车载设备的主要特点是采用一次速度控制模式曲线，并将地面固定信息存于车载设备的处理模式。其硬件配置见表 2.6-25。

表 2.6-25 FZL 车载 ATP 系统硬件配置 (单驾驶室)

设备名称		设备数量
驾驶台人机接口单元 (套)		1
驾驶室机柜	主机板 (块)	2
	地面信息接收板 (块)	2
	接口板 (块)	2
	电源板 (块)	4
	记录板 (块)	1
车体下部	ATP 天线 (套)	2
	光电速度传感器 (套)	2

①主机板。主机板采用双套硬件，双套软件，多级比较，相互校验等方式。其主要功能如下：根据地面信息及车载设备存储的地面固定信息，计算速度—距离模式曲线，包括紧急制动曲线、全常用制动曲线及报警曲线；测量并采集列车实际速度信息，实时核算列车位置，实时处理、比较列车实际速度、列车位置信息及速度—距离模式曲线给定值，并根据比较结果给出相应的全常用制动、紧急制动、报警控制指令及报警卸载指令；利用轨道电路绝缘节信息，消除测速测距累积误差；根据地面传送的信息、车载存储的信息及列车的运行速度信息给出允许开门的指令；监督列车运行方向。其主机系统软件任务为测速测距任务，测量周期为 0.5s；I/O 读取任务；CAN 通信控制任务；输出控制任务；系统消息处理任务；错误处理任务；自检任务。

②地面信息接收板。ATP 车载接收板的主要功能是接收轨道电路信号，进行载频判决，幅度判决，解调和识别帧，校验解调后识别的帧内容，提取帧的有效信息，比较两个 CPU 的处理结果，并经 CAN 总线与车载主机通信。

③输入输出板。主要是提供监控列车制动和门控环节的输入输出控制接口，保证制动功能与门控功能的实施；采集与控制列车相关的开关量信息，为车载设备提供车辆状态。输入输出板主要包括 16 路安全输入接口、12 路安全输出接口及相应的反馈检查接口。

2) 操作模式。FZL 型 ATP 具有 3 种操作模式：

①ATP 人工驾驶模式 (监控模式)。ATP 人工驾驶模式是车载 ATP 系统正线运营的基本操作模式。司机负责驾驶列车、车站停站和开关车门；车载 ATP 系统执行限速监控，并为列车车门开闭提供安全监控。ATP 人工驾驶模式具有人工正向驾驶子模式及人工退行驾驶子模式。在此模式下，允许司机以低于 ATP 限制速度操控列车正向运行。其正向子模式建立的必要条件是接收有效的地面信息、自检正确，并且列车能够正确定位。当选定退行驾驶后，可人工驾驶列车以低于 10km/h 的速度退行，行走距离小于 10m。

②ATP 限速驾驶模式 (限速模式)。一般在地面无有效地面信息或列车进出车场或地面设备故障时，可构成 ATP 限速驾驶模式。在此模式下，列车处于固定的速度 (20km/h) 监督及停车开门的监督；当在特殊情况下，列车处于监控模式时，在列车发生紧急制动停车后或列车速度低于 20km/h 时，司机按下 RM 按钮，也可转为限速模式。

③切除模式。切除模式一般是在车载设备出现故障时采用。在此模式下，车载 ATP 与制动的接口被切除，列车运行安全由司机负责。此外，系统预留了 ATO 的自动驾驶模式。

3.3.4 列车自动运行系统

列车自动运行系统，即列车自动驾驶系统，是实现列车

自动调速、停车和车门开关等控制功能所需成套设备组成的构成体。ATO 系统包括车载与地面设备。我国在 20 世纪 60 年代曾成功研发了 ATO，但未投入实用。目前引进的 ATC 系统均包括 ATO 系统，本部分仅介绍 ATO 的功能及主要控制原则。

ATO 是 ATC 系统的重要子系统，该系统利用车载固化信息及从地面接收的信息实现列车的牵引、制动等控制。ATO 子系统可以代替司机的大部分操作，具有实现列车运行操作规范化、准确执行行车计划、提高行车效率和实现列车运行的最佳控制及节能处理，使列车处于最佳运行状态，对提高乘客舒适度、列车正点率，节约能源等起到重要作用。其子系统在 ATC 系统中的位置如图 2.6-68 所示。

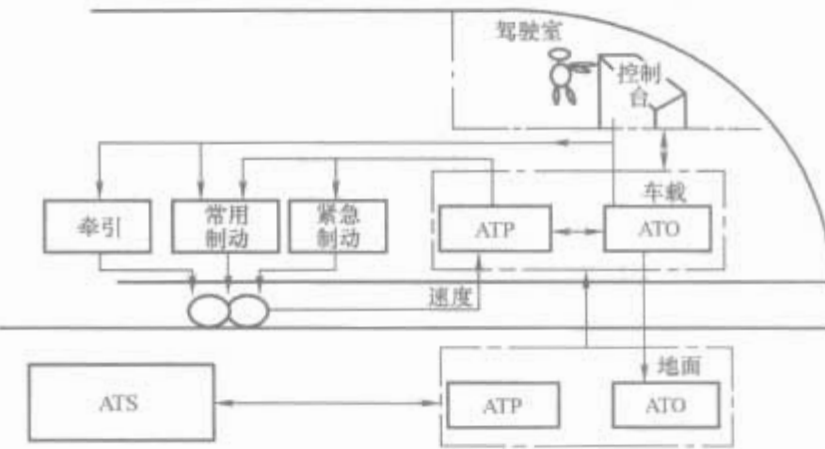


图 2.6-68 ATO 子系统在 ATC 系统中的位置

3.3.4.1 主要功能

ATO 系统的功能依靠自身及信号各子系统协调控制共同完成。ATO 不属于故障—安全系统，其运行速度始终低于 ATP 系统的防护速度，实现 ATP 安全防护下的 ATO；ATO 系统接受 ATS 的运行调整指令，实现站间及车站的运行时分调整控制和折返作业的自动运行控制。

ATO 子系统功能主要包括实现列车自动驾驶及有人/无人自动折返功能。

ATO 完成列车的牵引、巡航、惰行和制动的控制，实现正线、折返线及出入段 (场) 线运行的自动控制；实现区间运行时分调整控制。按照设定的运行曲线，根据 ATS 指令选择最佳运行工况，确保列车按运行图运行，实现列车运行自动调整和节能控制。

ATO 系统在 ATP 的安全防护下对相应站台侧的车门、站台门进行开关控制。只有车门、站台门关闭后，方允许列车启动。

区间停车及车站站台定点停车控制。ATO 模式下列车站台停车精度可优于 ±0.5m。

实现与 ATS、ATP 子系统的接口及信息交换。

3.3.4.2 ATO 与 ATP 的关系

图 2.6-69 所示为 ATP/ATO 系统控制关系中的一种可能模式。它表示出 3 种制动曲线类型与相互关系。

曲线①表示列车的紧急制动曲线，由 ATP 系统生成，



图 2.6-69 ATP/ATO 系统制动控制关系中的一种可能模式

并监控。列车一旦触及该制动曲线，立即启动紧急（强迫）制动，以保证列车的运行安全。列车必须停稳后才能重新启动。

曲线②的减速率小于曲线①的减速率，一般取与最大常用制动对应的减速率值。当列车速度达至该曲线值时，应给出告警，但不启用紧急制动。根据系统控制模式，可不设曲线②。

曲线③则是由 ATO 系统动态计算的制动曲线，即正常运行情况下的停车制动曲线。通常将与该曲线对应的减速度设计约为 0.75m/s^2 。由于 ATO 减速/停车控制为制动力的渐变过程，其减速度变化率宜小于 0.9m/s^2 。

3.3.4.3 ATO 子系统构成与控制

(1) 系统构成。ATO 系统执行的列车起动、加速、惰行、制动、进站停车、自动折返作业、进出库作业等的自动驾驶过程是一个闭环反馈控制过程。ATO 系统接受 ATS 子系统的运行调整指令，ATP 子系统的目标速度、实际速度和列车基本定位信息，以及 ATO 自身的定位信息等完成列车自动运行控制。其基本关系框图如图 2.6-70 所示。

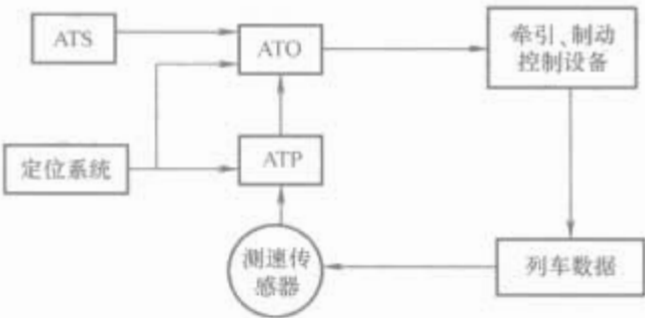


图 2.6-70 ATO 系统基本关系框图

(2) ATO 子系统的控制模式。ATO 系统按照站间及车站设定的模式曲线实现车站的起动控制、站间的速度调整控制、限速控制及进站的定点停车等控制。图 2.6-71 所示为 ATO 控制下的列车站间运行轨迹示意图。

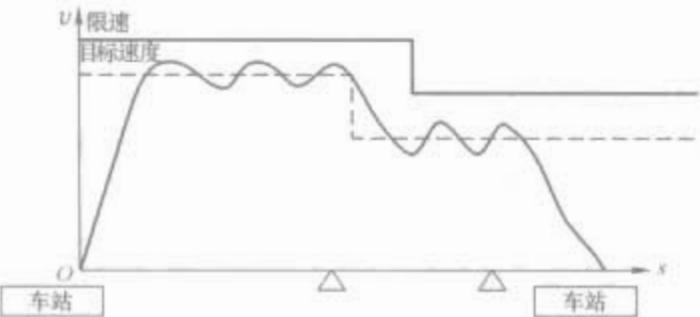


图 2.6-71 ATO 控制下的列车站间运行轨迹示意图

ATO 系统按控制方式主要分为 3 种类型，下述示例均以停车控制为例，也适用于站间调速控制。

1) 比例控制方式。该算法根据预先设定的 $v-s$ 标准控制曲线 (P_0) 实现列车的追踪控制。图 2.6-72 所示为比例控制过程举例。

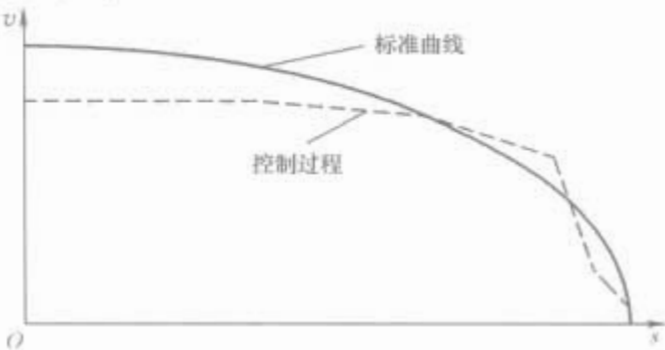


图 2.6-72 比例控制过程举例

2) 区域控制方式。该算法根据预先设定的多条 $v-s$ 标准控制曲线实现列车的追踪控制。其控制模式如图 2.6-73

所示。以制动控制为例，区域控制方式的设计原则为列车追踪标准曲线 P_0 。当列车速度处于 $P_1 \sim P_0$ 区域时，ATO 对列车施以制动力 P_{10} ；当列车速度处于 $P_0 \sim P_2$ 区域时，ATO 对列车施以制动力 P_2 ，要求列车在区域内运行直至列车在预定位置停车。

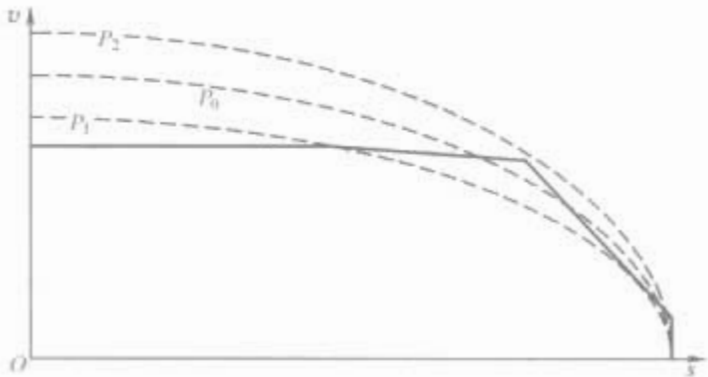


图 2.6-73 区域控制模式

3) 预见模糊控制方式。该方式是以熟练驾驶员的经验为准则，以列车为控制对象的一种控制方式。在采用模糊控制理论后，由简单地模仿司机的操作，变成理论化地预见模糊控制 ATO。利用预见模糊控制概念将 ATO 的控制过程描述成司机的操作策略，并定义语言描述所涵盖的性能指标意义；定义预测操作结果，将描述的司机控制策略转变为可对目标控制结果进行预见的模糊控制准则。预见型模糊控制的控制准则 R_i 可以描述为

若 X 是 A_i 和 B_i ，则 U 是 U_i

式中： X 为系统现行状态； A_i, B_i 为现行状态的参数； U 为控制动作的集合； U_i 为某一具体动作。

图 2.6-74 所示为列车停车过程的预见型模糊控制流程图。

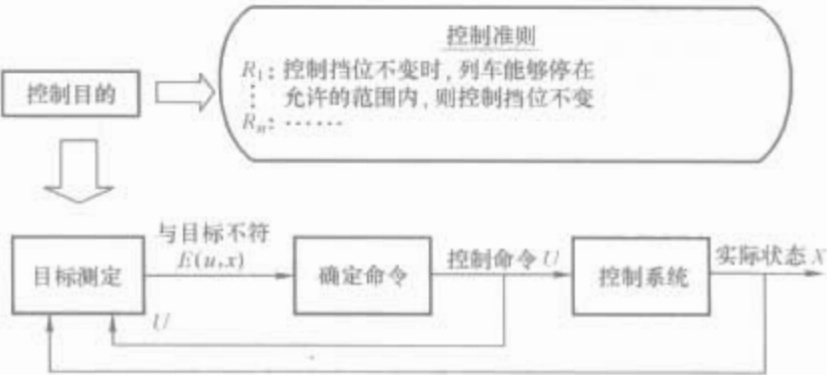


图 2.6-74 列车停车过程的预见型模糊控制流程图

3.3.5 无人驾驶系统

全自动驾驶系统 (Fully Automatic Operation, FAO) 是在 ATO 基础上逐渐发展而成的。其与有人监督下的 ATO 相比，具有可靠性和安全性高，增大线路通过能力，提高旅行速度，减少车辆需求，减少定员，提高服务，降低系统生命周期成本等优势。

国外在 20 世纪 80 年代初步形成了无人驾驶系统 DTO (driverless train operation system)，后在 DTO 的基础上发展了 FAO 系统。FAO 系统多运用在中、小运量的乘客自动运输系统 (Automated People Movers, APM)。

随着 FAO 系统技术的成熟及通信、控制、网络技术的发展，为高密度、大运量的地铁与轻轨实现 FAO 成为可能。FAO 系统的技术基础主要是高可靠性、高可用性和高安全性的信号系统、地-车双向通信和综合能力强的运营组织管理系统及应急处理能力。

FAO 系统实现列车的自动起动及自动运行、车站定点停车、全自动驾驶自动折返、自动出入车辆段等；同时，对车上乘客状况、车辆状态、列车设备状态进行监视和检测，

对列车各系统进行自动诊断，将列车设备状况信息及故障报警信息传送至控制中心，对各种事件分门别类，制定处置预案。

FAO系统的控制基础仍是信号系统，其实现列车安全控制和间隔控制与传统的ATC系统基本组成、功能和安全性要求基本相同。但要求相关系统的可靠性、可用性及应急预案的处理能力将大为提高。

建设FAO系统的要点是系统的综合及行车组织管理。在运营组织上需要增加紧急情况下的预案处理功能和措施；需要对轨道交通系统进行综合整合，包括站场、车辆段等的设备配置，保证信号、通信、供电、防灾报警、站台安全、车辆等系统的协同运行。全自动驾驶系统FAO结构组成如图2.6-75所示。



图 2.6-75 全自动驾驶系统 FAO 结构组成

3.3.6 车辆段（场）信号系统

车辆段作为城市轨道交通的列车存放、维修综合基地，日常涉及行车的作业主要包括接发列车作业、段内调车作业、试车作业等。为实现车辆段运营作业的要求，在我国城市轨道交通运营的车辆段中，配置了集中联锁系统，以满足运营的基本作业要求。城市轨道交通的车辆段（场）通常设有试车线，用于车辆动态调试及ATC车载设备调试等。

车辆段（场）集中联锁主要设于信号楼内，其主要控制模式为信号值班员对道岔和信号机实行集中操纵。当系统采用无人驾驶模式时，车辆段的信号系统可以实现自动控制功能。而停车场的信号系统根据需要，可为人工控制或纳入ATC系统的自动控制。在城市轨道交通车辆段中，可采用电气集中联锁和计算机联锁。目前，电气集中联锁—继电联锁已较少采用，多采用计算机联锁。我国城市轨道交通正线及车辆段最早采用的国产计算机联锁为TYJL-II型计算机联锁。本部分可参见联锁系统章节。

4 信息技术

信息化是全球普遍关注和竞争的焦点，是当今世界经济社会发展的大趋势，已经成为推动人类社会高速发展的强大动力，成为各个国家实现现代化的重大发展战略。

自20世纪中期以来，在世界范围内，信息技术带动了轨道交通行业整体技术的迅猛发展，行车指挥自动化、客货快运网络化、市场营销信息化、安全装备系统化，使传统行业的面貌焕然一新。实践证明，信息化是轨道交通行业发展

的战略制高点和现代化的主要标志。

信息技术是能够延长或扩展人的信息能力的手段和方法，是在计算机和通信技术支持下，用以获取、加工、存储、变换、显示和传输文字、数值、图像、视频、音频及语音信息，并且包括提供设备和信息化服务的方法与设备的总称。对于轨道交通系统，以信息技术的概念，各业务管理与机电系统监控及综合自动化系统，如行车指挥与列车运行控制系统、编组站综合自动化系统、客运管理自动化系统、铁路运输管理自动化系统及铁路货运管理自动化系统等均可纳入信息技术范畴。考虑到通信信号系统的传统概念，本节所说明的信息技术相关系统仅包括较为经典的铁路运输管理信息系统（TMIS）、铁路列车调度指挥系统（TDCS）、铁路客票发售及预订系统以及综合自动化系统（综合监控系统，ISCS）等内容。

4.1 铁路运输管理信息系统 TMIS

TMIS建设是一项规模庞大、结构复杂的系统工程，是实现铁路运输管理现代化的重要举措。运输管理信息系统以实现货车、机车、集装箱的实时追踪管理为主要目标，逐步开发部、局、站段运输生产所需要的应用软件。

4.1.1 系统功能及系统结构

TMIS通过计算机网络从全路6000多个站名中选取2200个主要站段，实时收集列车、机车、车辆、集装箱及所运货物的动态信息，对列车、车辆、集装箱和货物进行节点式追踪管理，实现货票、确报、编组站、区段站、货运站、货运营销及调度系统的计算机管理，为全路各级运输管理人员提供及时、准确和完整的运输信息和辅助决策方案，提高了运输生产效率，改善了服务质量。

4.1.1.1 系统功能

TMIS的系统功能是：

- (1) 运输市场信息和客户需求信息管理。
- (2) 运力资源信息管理。
- (3) 运输作业过程信息管理。
- (4) 管内现在车动态分布信息管理。
- (5) 管内集装箱动态分布信息管理。
- (6) 运输信息综合利用。

4.1.1.2 系统构成

TMIS是通过铁道部、路局、分局和车站应用系统、全路计算机网络系统、全路信息系统运行保障体系等信息工程项目的建设而逐步建成的。

(1) 铁道部系统。

1) 确报系统。建成全路确报原始数据库，收集全部确报，实现确报信息共享；实现跨局确报转发；覆盖880个确报点。

2) 货票系统。建成全路货票原始数据库，收集全部货票和装载清单，实现货票数据共享；实现到达货票转发；提供货运清算数据；实现货票综合应用；覆盖2000多个制票点，包括1200个设计制票站，273个车务段和扩大实施的一批非设计制票站，最终可达万余个制票点，3650个站段。

3) 集装箱追踪系统。建成全路集装箱原始数据库，实现集装箱数据共享；实现跨局集装箱报告转发；实现在途箱位置追踪；600个集装箱办理站实现集装箱报告，包括扩大实施的148个非设计报告站。

4) 车号自动识别信息报告系统。建成全路车号自动识别报告信息原始数据库，实现车号自动识别报告信息数据共享；实现分界口跨局（分局）车号自动识别报告信息转发；

覆盖 530 个车号自动识别系统信息报告点,实现 43 万辆部属货车、12 万辆企业自备货车和 1 万 6 千辆机车的车号、车次和位置信息的自动识别和报告。

5) 货运营销与生产管理系统。建成全路原提货订单、核准货运订单原始数据库和执行动态库;实现全路货运营销计划和技术计划的编制、下达;实现 1200 个货运站和 273 个车务段及与重点货主联网。

6) 运输日常调度系统。建成调度信息应用数据库;实现日班计划,以及调度命令的编制和下达。

7) 大节点货车追踪系统。建成中央列车、货车、集装箱动态信息库;实现基本的中央报告命令集;实现基本的中央查询命令集;覆盖 530 个大节点追踪车站。

8) 运输信息综合应用系统。利用各原始数据库的有关信息建立列车和车辆动态库、历史库;建立综合应用数据库,实现运输信息的综合利用及货车使用费清算。

9) 铁道部处理中心。建成 3 台大型主处理机并行综合体系统;完成各前置处理机系统整合;完成中央通信子系统整合;建成 TMIS Web 应用服务器系统;优化各应用系统资源配置。

(2) 路局和(分局)系统。

1) 确报系统。建成本级确报信息原始数据库,实现本级确报信息共享;实现确报转发。

2) 货票系统。建成本级货票原始数据库,实现本级货票信息共享;实现货票转发。

3) 集装箱系统。建成本级集装箱报告原始数据库,实现本级集装箱报告数据共享;实现集装箱报告转发。

4) 车号自动识别信息报告系统。建成本级车号自动识别报告信息原始数据库,实现本级车号自动识别报告信息共享;实现车号自动识别报告信息转发。

5) 货运营销与生产管理系统。建成本级货运订单原始数据库;实现货运订单审批、营销计划与技术计划的编制、下达。

6) 路局运输日常调度系统。建成路局运输日常调度应用数据库;实现日班计划与调度命令的接收、编制、上报、下达。

7) 分局调度管理系统(含直管站段路局)。建成各分局和直管站段各路局的调度系统;实现与车站系统、路局调度系统、中央追踪系统的信息交换。

8) 运输信息综合应用系统。综合利用本级确报、货票、货源订单、集装箱报告和车号自动识别信息报告等原始数据库的信息,建立运输信息综合应用数据库,实现本级运输信息综合应用。

9) 信息中心资源整合。完成分局调度专用系统配置;完成处理中心系统资源扩充和整合;完成网络通信系统整合。

(3) 车站系统。

1) 大、中型车站和小型区段站综合管理信息系统。实现现车管理,含确报系统、车号自动识别报告系统;实现货运营管理,含集装箱系统、货票系统;实现货运营销和生产管理;实现本站作业信息上报和到达信息接收;实施大型车站 163 个(UNIX 系统),中型车站 277 个(SCO UNIX 系统),小型区段站 119 个(SCO UNIX 系统)。

2) 小型货运站综合管理信息系统。实现简易的现车及货运、集装箱、货票、货运营销等管理功能;实施纯小型货运站 672 个(SCO UNIX 系统或 Windows NT 系统)。

3) 车号自动识别信息报告系统。自动抄车号信息报告

点共 530 个,其中,通过车站信息系统报告的有 492 个,无车站信息系统的分界口报告点有 38 个。

4) 集装箱报告系统。集装箱报告点设在有 5t 以上集装箱作业的车站,共 600 个,其中通过车站系统报告的 452 个,扩大实施的非设计集装箱报告站 148 个(含 11 个港口站)。

5) 车务段报告系统。实现管内小站货运制票;实现管内小站货运营销和生产管理;实施车务段 273 个。

6) 机务段报告系统。实现机车统计;实现机车报告;实施机务段 181 个。

7) 车辆段和车辆厂信息管理系统。实现车辆段(厂)内检修车统计;实现车辆检修报告;实施车辆段 146 个;实施车辆厂 23 个。

8) 站段系统资源整合。实现车站一套服务器的资源扩充和整合;实现车站通信资源整合;实现车站应用系统整合。

(4) 计算机网络。

1) 规范铁路计算机网络 IP 地址。统一 IP 地址编码;建成域名管理系统;建成用户目录管理系统。

2) 建成适应 TMIS 通信模式的 MQ 通信平台。适应各级系统统一通信出口、原始信息逐级上报和转发的通信模式;将各级应用系统的信息交换统一到 MQ 通信平台,增加 MQ 通信平台的服务功能。

3) 建成高速骨干网。连接部、局、分局的骨干网数据传输率为 2Mbit/s 以上。

4) 提高基层网数据传输速率和覆盖范围。扩大基层网覆盖面,满足实时处理系统的需求;特等站、一等站和沿干线二等站基层网传输率达到 2Mbit/s;70%的其他设计联网站段,基层网数据传输率为 64kbit/s。

5) 完善机关局域网。调整网络结构,提高安全防范水平;完善拨号访问系统。

6) 建成铁路内部 ISP 网络。完成企业内部网建设,部/局/分局用户本地接入,车站用户就近接入;企业内部用户通过本地 Web 服务器访问铁路生产网资源;建立铁路外部用户访问铁路企业内部网的安全机制。

(5) 运行保障体系。

1) 生产运行调度。建立运行机制,落实信息系统生产运行调度体制、机构、人员,开通调度系统。

2) 联机用户支持。开通部、局联机支持中心,建立 24h 服务机制。

3) 网络管理。开通部、局网管中心;开通条件较好的分局网管中心;建立三级分工监控和管理机制。

4) 安全管理。建立基于网络的攻击防御系统;建立基于主机的攻击防御系统;建立安全漏洞扫描系统;建立病毒防治系统。

5) 系统资源管理。建立较完善的中央系统监控和管理系统;局、分局开通处理中心系统资源管理系统;条件较好的分局实现对站段系统的监控和管理。

6) 应用软件开发与版本管理。

7) 应用软件和编码维护。部中心建立全路编码维护机制和部统一应用软件维护机制。

8) 设备维修。设置了 500 个维修站,并规范了设备维修机制,制定设备维修规程。

9) 培训。建立部培训中心和远程教育等系统,完善培训教育机制。

4.1.2 系统体系结构特点

TMIS 总体规划体系结构设计主要参照了加拿大国铁(CN)的 TRACS 系统模式,结合我国铁路运输管理体制,

对系统进行了二次开发。该设计具有以下特点：

- (1) 采用集中建库与分布处理相结合的原则。
- (2) 采用平面式网络体系结构，允许多协议并存。
- (3) 采用主机/终端模式构建各级系统。
- (4) 中央实时信息库采用文件系统实现数据组织和管理，提高响应速度。

(5) TMIS 功能设计主要考虑铁路运输管理过程的需求。

2001 年，铁道部电子计算技术中心依据铁路运输发展和改革的新需求，适应信息技术的发展，对 TMIS 的体系结构进行了如下调整：

- (1) 坚持集中与分布相结合的原则，建立路/分局原始数据库，强化路局/分局应用建设。
- (2) 坚持实时处理与批处理相结合的原则。
- (3) 坚持纵向业务功能系统与横向综合应用系统相结合的系统开发和建设原则。
- (4) 采用原始信息逐级上报和逐级转发的数据交换方式。
- (5) 采用分层式网络体系结构，统一网络协议。
- (6) 采用多层式客户机/服务器系统结构。
- (7) 采用数据库管理系统，完善数据组织，减少冗余度，提高共享性。
- (8) 采用中间件技术，统一 TMIS 数据交换平台。
- (9) 加强网络管理、系统管理和应用管理。
- (10) 强化系统可靠性和安全性。
- (11) 加强基础数据的统一维护。

4.1.3 TMIS 与其他系统的关系

在铁路信息化蓝图中，TMIS 系统是业务管理信息系统的重要组成部分，而业务管理信息系统又以 TMIS 为核心。见图 2.6-76 铁路信息化层次模型。



TMIS 与铁路信息化其他信息系统间有着密切的联系。图 2.6-77 表示了 TMIS 与其他信息系统的关系。

4.1.4 系统组成

TMIS 由铁道部中央级系统、铁路局级系统、铁路分局级系统和站（段）级系统构成。各级系统通过铁路计算机通信网络互联，形成一个有机整体，其系统硬件组成示意图如图 2.6-78 所示。

TMIS 系统以货运管理为核心，包含 10 个管理信息系统，其软件系统组成如图 2.6-79 所示。

TMIS 是一庞大的分布式应用系统。为使 TMIS 应用软件适应全路推广的需要，必须对 TMIS 应用软件体系结构进行规范化和标准化。为此，TMIS 采用如图 2.6-80 所示的模型化的集成应用环境，该模型采用以下软件开发原则：

- (1) 大型商业/工业环境应用软件应采用层次化的体系结构。

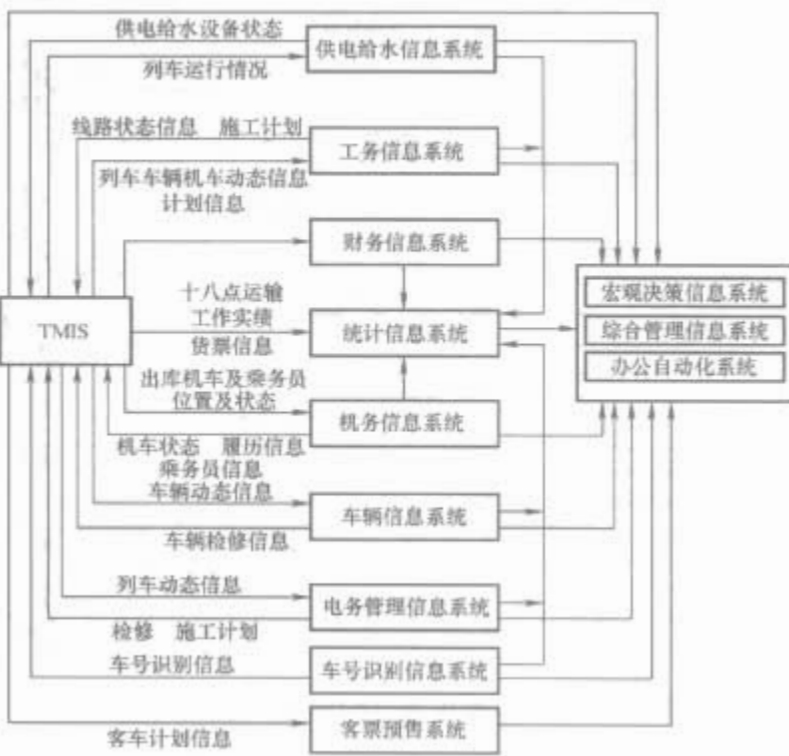


图 2.6-77 TMIS 与其他信息系统的关系

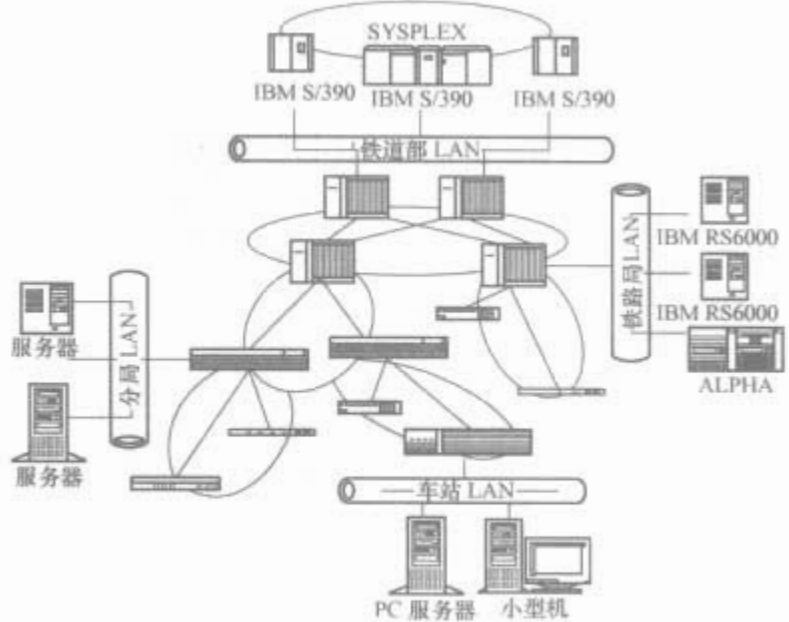


图 2.6-78 TMIS 系统硬件组成示意图

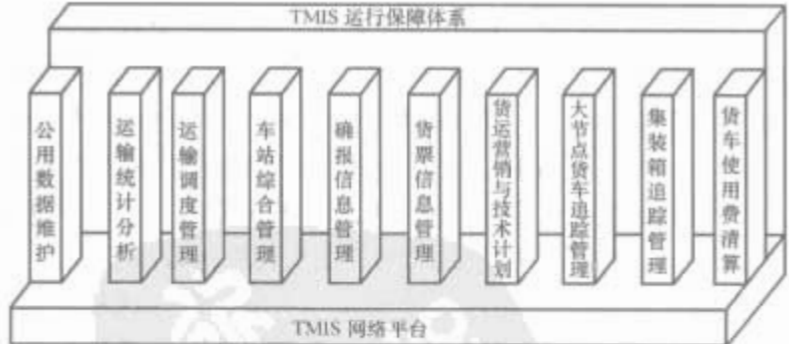


图 2.6-79 TMIS 软件系统组成

- (2) 基于组件的软件开发方法。
- (3) 应用与服务隔离。
- (4) 将可管理性和安全性作为设计要素融入应用软件。
- (5) 分布式应用环境采用统一的通信服务平台，屏蔽复杂的外界网络环境。

TMIS 方案在铁道部、铁路局和铁路分局采用相近的多层次（N-Tiers）客户/服务器体系结构，其构成示意图如图 2.6-81 所示；车站系统沿用两层式的客户/服务器结构。相对于原 TMIS 设计，该方案的突出变化是广泛地采用基于 Web 的应用开发技术和以浏览器为主要形式的客户端软件，统一用户界面。

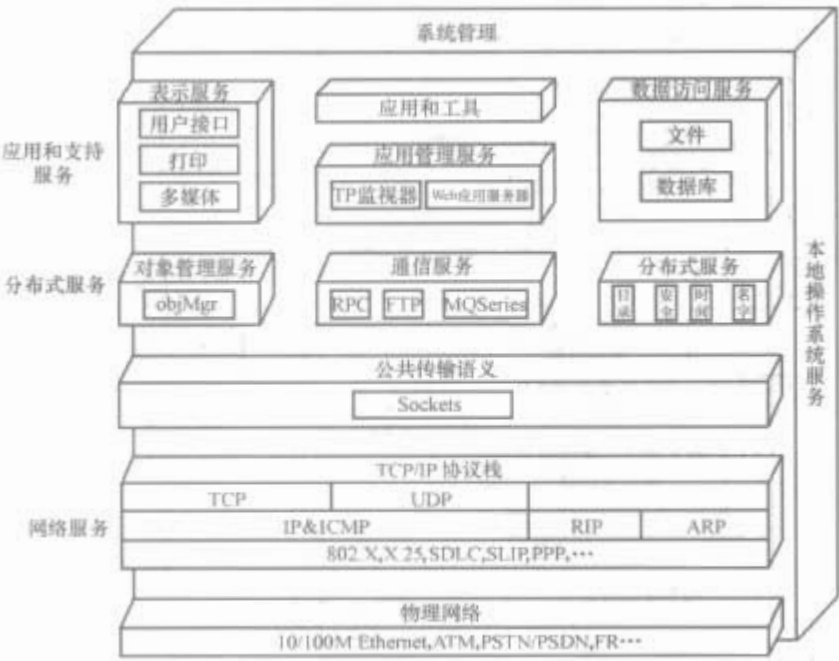


图 2.6-80 模型化的 TMIS 集成应用环境

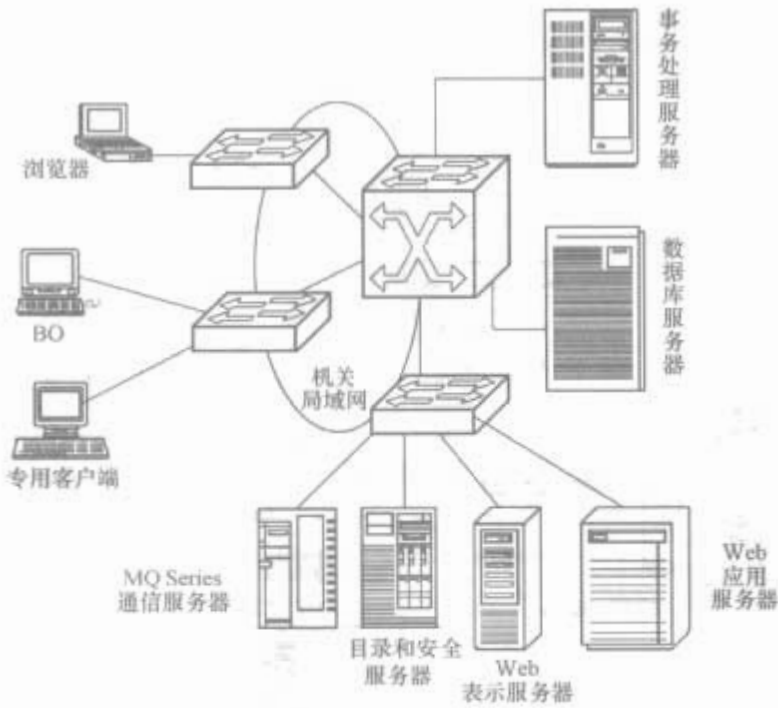


图 2.6-81 TMIS 基础构成示意图

4.1.5 系统网络结构

TMIS 是一个庞大的分布式系统。该系统由铁道部、铁路局、铁路分局机关局域网和约 2200 个站段，即局域网通过广域网互联而成。原 TMIS 网络设计采用平面式拓扑结构，允许多种通信协议并存。调整后的 TMIS 网络根据业务需要，划分为逻辑或物理分开的生产网、内部服务网、外部服务网和管理网，其体系结构广泛采用了层次化网络设计模型。

为使网络具有稳定性、伸缩性和可维护性等优化的功能和性能，采用了层次化体系结构，其层次化网络概念模型如图 2.6-82 所示。

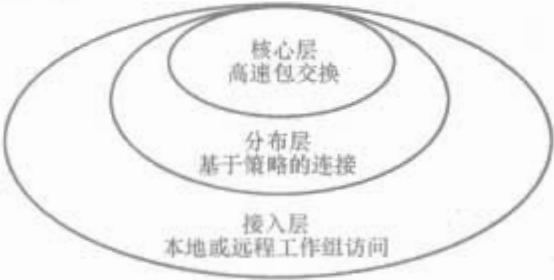


图 2.6-82 层次化网络概念模型

核心层的主要功能是作为高速交换主干，实现数据包的快速交换。该层网络通常不执行交换功能以外的针对数据包的任何操作，如访问控制表和过滤等，这些操作可能降低包

交换的速度。核心层网络设备为路由器或第 2 层交换机。分布层的主要功能是将大量的访问路径集中到高效路径。分布层设备通常包含第 3 层中继，其网络设备可以是传统路由器或第 3 层交换机。当采用 WLAN 时，可以用第 2 层交换机聚集带宽。

接入层的主要功能允许最终用户访问网络。接入层允许远程节点通过 WAN 技术访问企业网络，如帧中继或租用线等。接入层可以使用访问控制列表或过滤器满足特定用户的需求。

TMIS 局域网设计采用基于多层交换技术的新兴园区网结构，如图 2.6-83 所示。铁道部级机关采用 ATM 高端交换机作为核心层，支持第 3 层交换的快速以太网交换机作为分布层，10MB 以太网交换机作为接入层；路/分局机关采用支持第 3 层交换的快速以太网交换机作为核心层，并运用压缩式核心层设计，将分布层功能并入核心层；站段级局域网采用交换式或共享式结构。

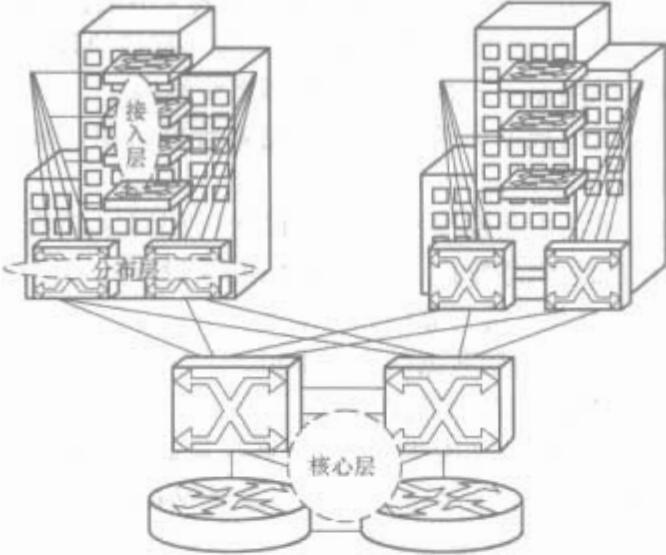


图 2.6-83 TMIS 局域网结构设计

TMIS 广域网结构设计采用多层次式路由网络体系结构，如图 2.6-84 所示。核心层使用企业级路由器，分布层使用部门级路由器，访问层使用工作组级路由器。

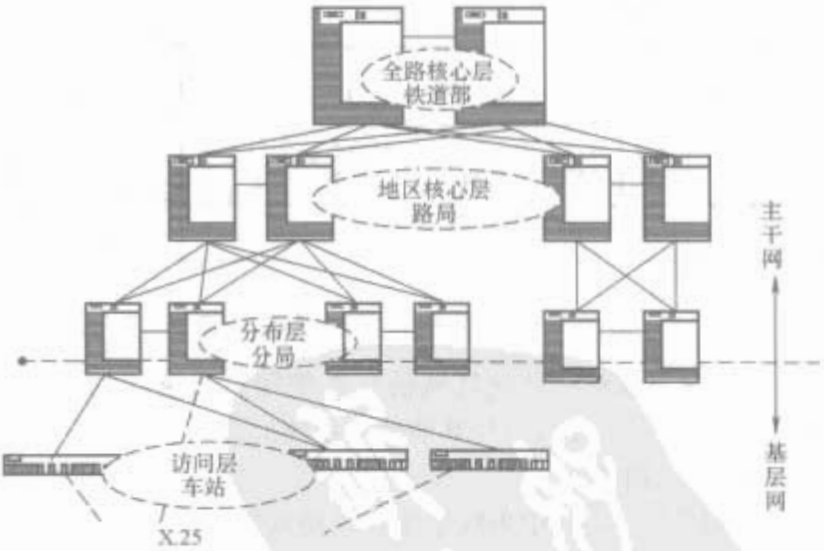


图 2.6-84 TMIS 广域网结构设计

连接 TMIS 广域网设备的通信介质有专线和交换网络等多种形式。连接主干网节点的通道以数字专线为主、帧中继网路为辅；连接基层网的通道以专线为主、其他接入方式为辅。

TMIS 网络通信协议采用 TCP/IP，路由选择协议采用 OSPF、RIP 和静态路由，网管协议采用 SNMP。TMIS 信息交换平台采用网络通信中间件 MQSeries 产品。

4.1.6 数据库管理

调整后的 TMIS 系统以关系数据库管理系统实现数据的存储管理和访问操作。TMIS 系统主要数据源如下：

4.1.6.1 公用基础编码信息

- (1) 路网描述信息。
- (2) 管界描述信息。
- (3) 车站属性描述信息。
- (4) 货物属性描述信息等。

4.1.6.2 运力资源配置信息

- (1) 车辆管理机构描述信息，如车辆段（厂）、列检所等。
- (2) 机务管理机构描述信息，如机务段、折返段等。
- (3) 部属（自备）车辆技术履历。
- (4) 机车技术履历。
- (5) 部属（自备）集装箱技术履历。
- (6) 列车运行时刻表。
- (7) 主要技术站解/编能力。
- (8) 主要货运站装/卸能力。
- (9) 工务桥、隧界限、承载、限速等规定。

4.1.6.3 运输生产作业信息

- (1) 列车编/解、到/发时间信息，以及“运统一”信息等。
- (2) 机车出/入库、整备/检修、运/非状态信息，以及乘务组人员信息等。

- (3) 车辆出厂/报废、装/卸、空/重、运/非转换等信息。
- (4) 集装箱出厂/报废、到/发、运/非转换、空/重等信息。
- (5) 货物属性、货票、货运订单等信息。

TMIS 在铁道部、铁路局和铁路分局系统中设置的主要数据库为：

- (1) 基础编码库，包括站名、品名、车型/车种、路/分局代码等统一编码信息。
- (2) 原始数据库，包括货运订单库、确报库、货票库/装载清单库、自动抄车号报告库、集装箱库等。
- (3) 动态数据库，包括货源动态库、列车动态库、机车动态库、车辆动态库、集装箱动态库、营销计划完成实绩库等。
- (4) 批处理数据库，包括列车轨迹库、货车轨迹库、货票库等。
- (5) 历史数据库，用于整理和存储长时间、大容量的数据，供运输统计、指标分析和决策支持。

TMIS 数据库之间的相互关系及主要的信息来源如图 2.6-85 所示。

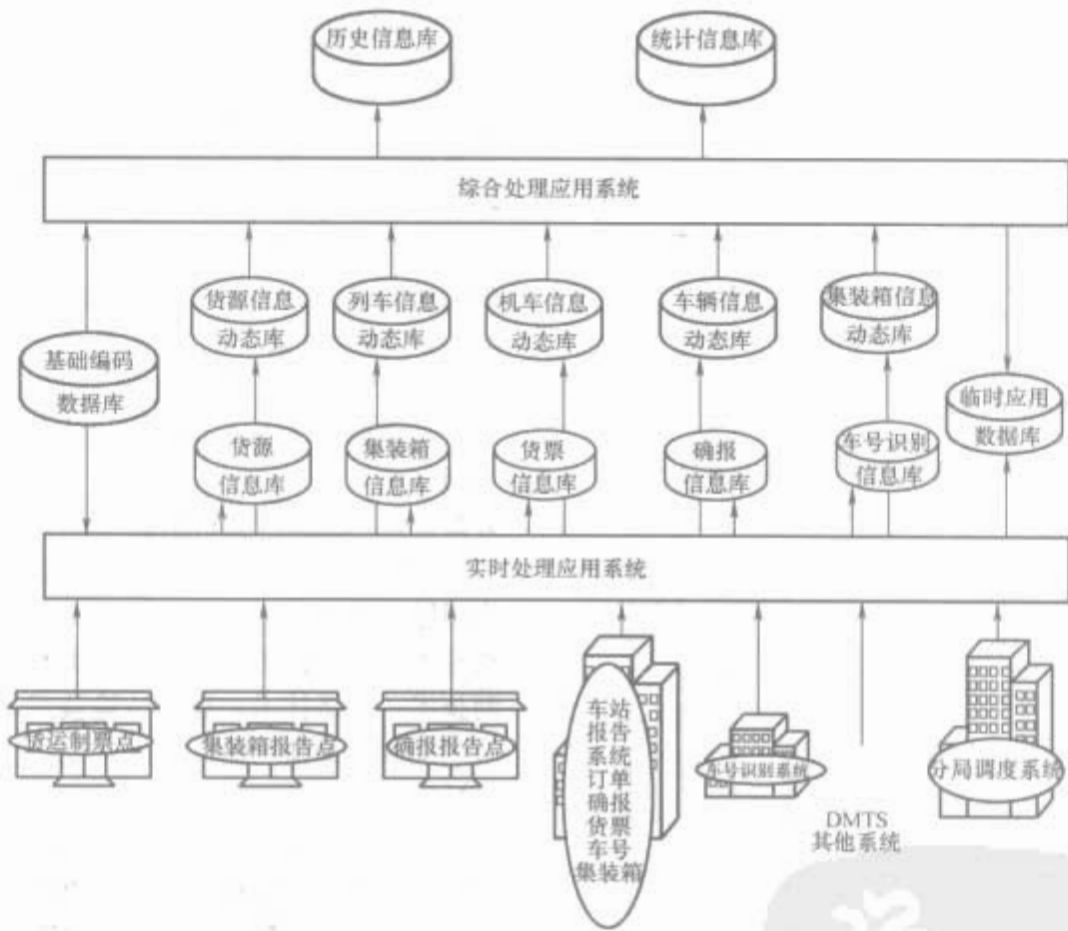


图 2.6-85 TMIS 数据库之间的相互关系及主要的信息来源

4.1.7 系统应用配置

TMIS 系统在铁道部、铁路局和铁路分局各级运输管理部门中实现综合信息应用，其功能部署基本相似。车站既是运输作业的现场，又是原始信息的采集点。所以，车站管理信息系统更多地表现为作业管理功能和数据采集报告功能。

TMIS 主要应用或在铁道部、铁路局、铁路分局和车站的配置如图 2.6-86 所示。

TMIS 各级系统的需求、功能和规模不同，对信息系统的平台配置要求也不同。TMIS 平台主要有 3 类：计算机硬件平台、计算机软件平台和计算机网络平台。

TMIS 各级系统的计算机硬件平台配置见表 2.6-26。

表 2.6-26 TMIS 各级系统的计算机硬件平台配置							
设备系统	S/390	RISC				Intel	
铁道部	✓	✓			✓	✓	
铁路局		✓	✓	✓	✓	✓	✓
分局		✓	✓	✓	✓	✓	✓
车站		✓	✓			✓	

在 TMIS 各级系统中的计算机软件平台配置见表 2.6-27。

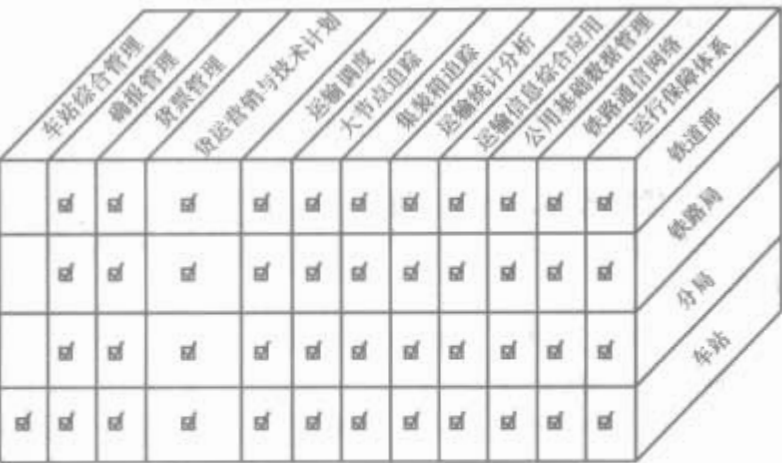


图 2.6-86 TMIS 应用配置图

表 2.6-27 在 TMIS 各级系统中的计算机软件平台配置

系统类别	软件配置		铁道部	铁路局	分局	车站
操作系统	UNIX	IBM OS/390	√			
		IBM AIX	√	√	√	√
		DIGITAL UNIX	√	√	√	√
		HP-UX	√	√	√	
		SUN SOLARIS	√	√	√	
		SCO UNIX				√
		Microsoft NT	√	√	√	√
数据库	ORACLE		√	√	√	√
	SQL SEVER		√	√	√	√
	DB/2		√			
中间件	MQSeries		√	√	√	√
应用服务器	Web Sphere		√	√		
	NetScape AS				√	
Web 服务器	Netscape Web Server		√	√	√	
	Microsoft IIS		√	√	√	
电子邮件	Microsoft Exchange		√	√	√	√
电子证书管理	NetScape CA Server		√			
目录管理	NetScape LDAP Server		√	√	√	
域名管理	IBM DNS		√	√		
	Microsoft DNS				√	
网络管理	Sun NetManager		√	√	√	
	Bay Optivity		√	√	√	
	3Com Transcend		√	√	√	
	Cisco works		√	√	√	
系统管理	CA UnicenterTNG		√	√	√	
	BMC partrol		√	√	√	
	Landmark		√			
安全管理	主机安全	IBM RACF	√			
		ISS real Agent	√	√	√	
	网络安全	IBM Firewall 3.x	√	√	√	
		北方电脑 NDIS	√	√	√	
	安全平分	ISS	√	√		
	病毒防治	NAI TVD	√	√	√	√
配置管理	CA CCC-Harvest		√	√		
运行管理	Remedy ARS		√	√	√	
分析报表	BO		√	√	√	

TMIS 各级系统中的计算机网络平台配置见表 2.6-28。

表 2.6-28 TMIS 各级系统中的计算机网络平台配置

设备系统	路由器	交换机	集线器
铁道部	Nortel BCN	CB 7000HD	3COM Portswitch
	CISCO 7511/3640	3COM CB 3500 SSII 3300/1100	
铁路局	Nortel BLN	3COM CB 3500	3COM Portswitch
	CISCO 7511/3640	SSII 3300/1100	
分局	Nortel ASN	3COM CB 3500	3COM Portswitch
	CISCO 7500	SSII 3300/1100	
车站	CISCO 2500	CISCO 19XX/29XX	ACCTON XXXX

4.2 TDCS

TDCS 原称铁路运输调度指挥管理信息系统（Dispatch Management Information System, DMIS）。TDCS 是实现铁路各级运输调度对列车运行实行透明指挥、实时调整、集中监控的管理信息系统。TDCS 实现对列车在车站和区间运行的实时监视，动态调整、自动生成列车运行滚动计划；实现列车调度命令的计算机下达和运行图实际的自动描绘。TDCS 采用网络概念将传统的区间、车站、编组站三段式信号组织方式整合为铁道部、铁路局等两级调度指挥中心的控制结构，以信息技术、网络技术、控制技术等技术手段取代了传统的行车指挥手段，结合先进的通信、信号、数据传输、多媒体等现代技术，实现 TDCS 与相关系统的紧密结合、互联互通、信息共享和行车指挥现代化，减轻了调度人员的劳动强度，改善了调度指挥的工作环境。

4.2.1 技术要求

TDCS 是融先进的通信、信号、计算机网络、数据传输、多媒体技术为一体的现代信息系统，其主要技术要求包括：

4.2.1.1 先进性与标准性

TDCS 是一个大型网络型的综合性系统。系统应采用符合国际标准和工业标准的开放式系统平台，系统应采用计算机技术、信息技术、智能决策技术、地理信息技术、远程控制技术、网络技术、数据传输技术及多媒体技术等新技术，采用国内外最新产品。

4.2.1.2 安全性和可靠性

TDCS 是行车调度指挥系统，其重点是行车调度指挥和管理。系统必须具有高可靠性和高安全性，保证 24h 无间断正常运转，以及数据信息的安全性和正确性。

4.2.1.3 实时性和可操作性

TDCS 是实时信息处理和实时过程控制系统。列车在运行过程中对铁路沿线的各种信号灯、道岔、轨道等信号设备的状态显示及位置产生大量的变化信息。按照铁道部信号专业相关标准：信息高峰时的过程延时不超过 4s；在 2 级 3 层的任何一台信息处理机上，信息必须实时、有序地处理。

4.2.1.4 开放性和可维护性

4.2.2 系统结构

我国铁路调度指挥机构由铁道部、路局、站段 3 级构成，行车调度指挥是调度日常指挥的核心工作之一。为适应现行的调度管理体制，TDCS 由铁道部、铁路局及车站 3 级系统构成，是一个覆盖全路的现代化铁路列车调度指挥系统。TDCS 系统结构如图 2.6-87 所示。

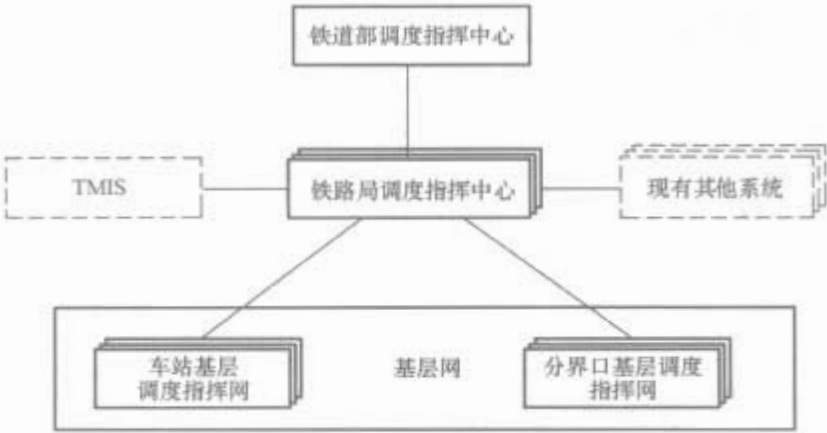


图 2.6-87 TDCS 系统结构

铁道部调度指挥中心处于最高层，是 TDCS 系统构成的核心。铁道部调度指挥中心 TDCS 以铁道部调度指挥中心大楼为主体，构成一个为行车调度指挥服务的局域网；通过专线通道、数据网链路、路由器与 18 个铁路局调度指挥中心远程连接，进行信息交换，并建立全路有关专业技术资料库。铁道部调度指挥中心能获得各铁路局分界口、重要铁路枢纽、主要干线运输状况和 TDCS 基层网等的实时信息。

铁路局调度指挥中心处于第 2 层，在各铁路局所在地建有铁路局调度指挥中心局域网。铁路局调度指挥中心通过专线通道、数据网链路、路由器与铁道部、相邻铁路局调度指挥中心远程连接，进行信息交换。铁路局调度指挥中心 TDCS 属管理层，同时也是直接调度指挥行车的指挥层，不仅要完成基层网信息的汇总、处理和标准化，给铁路局各级调度提供监视，而且还要按要求将基层信息通过专线通道、数据网链路上传到铁道部调度指挥中心。铁路局调度指挥中心具有列车调度指挥功能，也是行车控制中心。对于部分区段和车站，铁路局控制中心还可在 TDCS 的基础上发展调度集中 (CTC)，实现列车进路的自动控制。

TDCS 最下层是基层网，主要包括车站行车调度指挥系统等。

为适应 3 层体系结构，TDCS 构造了覆盖全国铁路的大型网络。各局域网间通过专线方式或采用专线为主用通道，数据网链路为备用通道方式连接，进行远程信息交换。TDCS 总体网络结构如图 2.6-88 所示。

图 2.6-88 中 TDCS 基层网主要由车站计算机网络设备、车站分机采集及控制设备、车站值班员终端 3 部分组成。TDCS 基层网系统构成如图 2.6-89 所示。

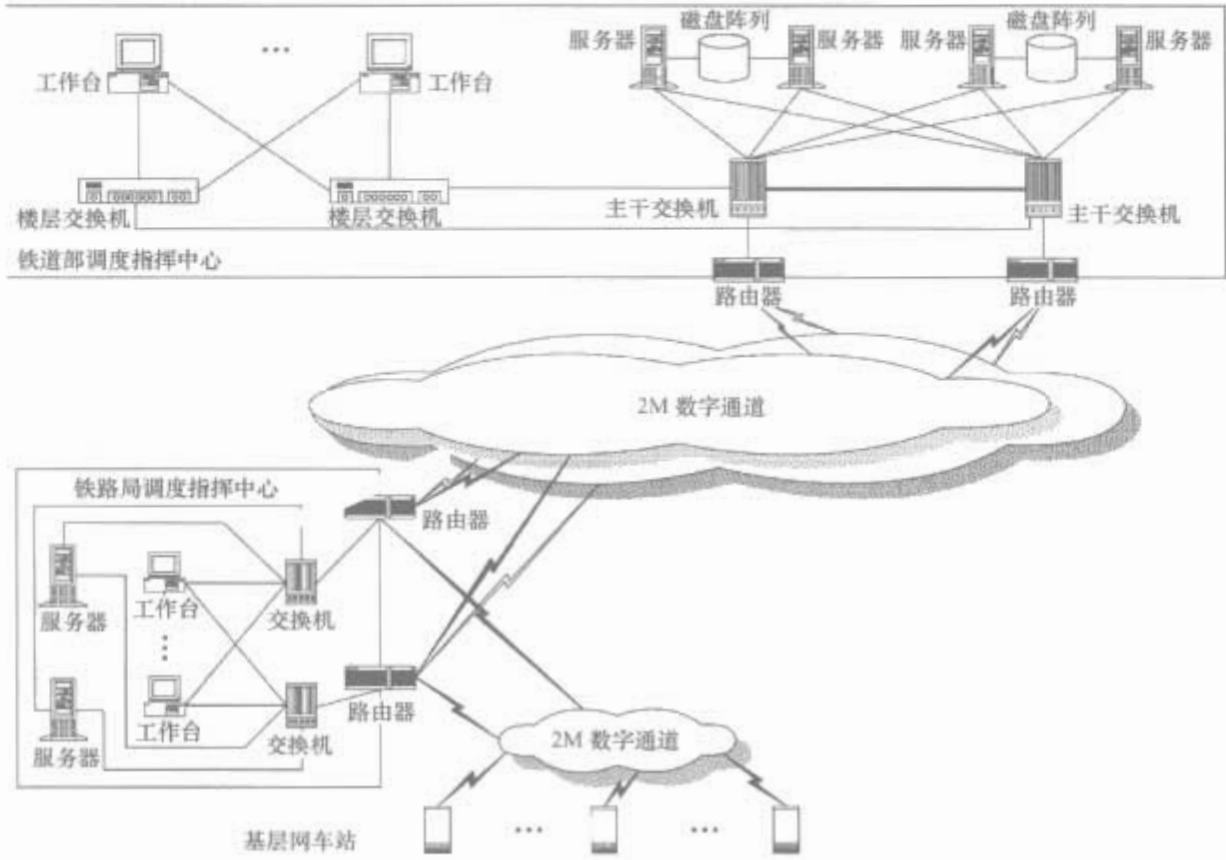


图 2.6-88 TDCS 总体网络结构

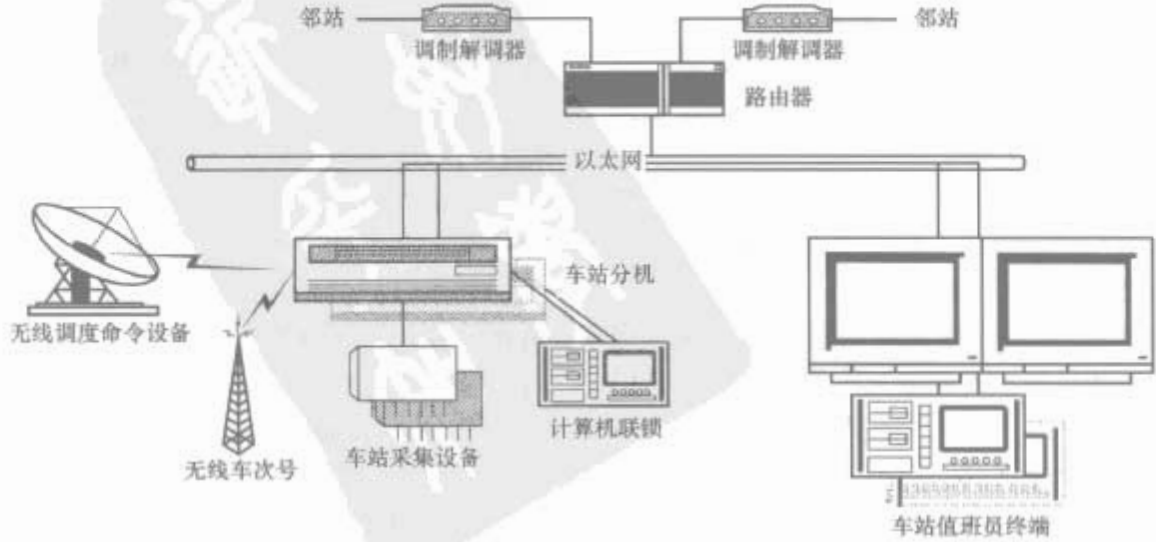


图 2.6-89 TDCS 基层网系统构成

TDCS 需要和目前已有的各类信息系统, 实现互联和信息共享。TDCS 具有以下主要接口关系:

- (1) 基层网与铁路局调度指挥中心。
- (2) 铁路局调度指挥中心与铁道部调度指挥中心。
- (3) TDCS 与 TMIS 的接口。
- (4) TDCS 与现有其他系统的接口。

4.2.3 系统功能

根据系统总体功能的划分, TDCS 可按列车运行监视、列车调度指挥、系统维护管理、调车作业管理、综合维修管理、分散自律控制 6 大部分描述, 如图 2.6-90 所示。其中调车作业管理、综合维修管理、分散自律控制为 CTC 系统在 TDCS 系统基础上增加的内容。



图 2.6-90 TDCS/CTC 功能结构

4.2.3.1 铁道部调度指挥中心 TDCS 主要功能

铁道部调度指挥中心 TDCS 功能主要涵盖列车运行监视、列车调度指挥、系统维护管理三部分。以下重点说明列车运行监视和列车调度指挥两部分。

(1) 列车运行监视。列车运行监视在铁道部级主要包括列车动态追踪、列车运行宏观显示、信号设备运用状态实时监视、列车运行时刻显示查询等功能。

1) 列车动态跟踪。铁道部 TDCS 根据铁路局 TDCS 现场采集轨道电路的占用和出清状态判断列车位置并跟踪; 根据铁路局 TDCS 逻辑跟踪判断并采用无线车次号校核系统进行车次号自动校核获得列车车次号, 自动进行列车定位和动态实时跟踪。

2) 列车运行宏观显示。铁道部 TDCS 采用基于 GIS 技术的电子地图方式宏观显示全路列车运行相关信息,

TDCS、CTC 的基层网系统完成对分界口、区段、枢纽的列车运行情况和现场状态的动态数据采集、传送和处理, 以图形、图像、文字等方式向调度人员及有关领导提供运输状态信息。以电子地图形式为底图的列车运行宏观显示画面是调度人员工作时的主界面, 缺省情况下显示各分界口的列车交接情况, 并由调度人员根据关注焦点, 在电子地图上打开相关的列车运行信息显示、运行图查询显示或报表统计查询等界面。铁道部 TDCS 在实现列车运行宏观显示和实时动态统计的基础上, 提供预警和告警功能。

3) 信号设备运用状态实时监视。该功能提供全路各车站站场的进路排列、信号显示、轨道电路占用, 以及列车车次号信息的显示。

4) 列车运行时刻显示查询。铁道部 TDCS 接收铁路局 TDCS 提供的基本图、阶段计划和实际运行图等数据, 获取

列车运行时刻信息,进行列车早晚点、列车到发或通过时刻等列车运行时刻的显示和查询。

(2) 列车调度指挥。在铁道部级,列车调度指挥主要包括运行图管理、调度命令管理、列车编组管理、数据统计分析等功能。

1) 运行图管理。列车运行图是组织列车运行的基础,它包括基本图、阶段计划和实际运行图等。铁道部 TDCS 接收铁路局 TDCS 提供的基本图、阶段计划和实际运行图等数据,提供全路各铁路局调度区段列车阶段计划的同步显示及列车基本图、实际运行图的查询显示,并按照铁道部运输调度工作特殊需求,提供多种运行图显示手段。查询该列车运行信息,并采用表格方式显示和打印。

2) 调度命令管理。铁路运输组织工作必须贯彻安全生产、集中领导、统一指挥、逐级负责的原则。铁道部调度员监督、指导全路列车调度指挥,适时发布调度命令。铁道部 TDCS 通过计算机网络系统向铁道部调度人员提供编辑、存储、下达、接收与查询调度命令等功能;同时,铁道部 TDCS 还提供查询显示铁路局采用无线传输通道,向车站、列车及其他受令终端,传送调度命令信息的功能。

3) 列车编组管理。TDCS 通过铁道部调度指挥中心实现与 TMIS 的结合,并辅以铁路局 TDCS 信息和 T/D 结合信息,获得列车编组顺序表信息,提供列车编组管理功能,实现全路列车编组和列车确报信息的查询、显示和打印。系统以列表的形式提供列车编组信息显示和打印。

4) 数据统计和分析。TDCS 根据建立的数据库信息和数据进行数据统计和分析,提供路局间分界口交接车统计;提供全路各条干线列车运行正点率、列车运行密度和早晚点原因统计等。

4.2.3.2 铁道局调度指挥中心 TDCS 主要功能

铁路局调度指挥中心直接指挥行车,实时掌握铁路局调度区段的组成车站、各分界口、各编组站、各枢纽的列车运行情况、信号设备显示状态,完成阶段计划的调整及调度命令的生成和下达等功能,进行信息汇总、处理,向铁道部及相邻铁路局 TDCS 提供行车信息。铁路局 TDCS 主要涵盖了列车运行监视和列车调度指挥、系统维护管理 3 个方面。以下重点对列车运行监视和列车调度指挥予以说明。

(1) 列车运行监视。列车运行监视在铁路局级主要包括干线列车运行秩序宏观监视、列车运行实时监视、列车追踪及历史查询等功能。

1) 干线列车运行秩序宏观监视。显示的主要内容为铁路局管内的宏观地图,按铁路线的实际走向显示铁路局管辖范围内铁路设施设备的位置和信息;实时动态监视主要干线各调度区段的列车运行正点率,并统计、显示及打印输出。

分界口运输状态宏观监视主要监视列车交接情况,显示交接列车汇总表、查询和输出。系统按 6h 为一个阶段自动统计交接车汇总表,并存入系统数据库;列车运行时刻表显示、查询和输出;列车正点和晚点定时报告,系统提供用户按分界口、定时间间隔设置系统自动显示早点和晚点的属性;分界口及邻站调度监督表示信息显示及历史情况再现;统计报表查询输出,正点和晚点统计、时刻表等运输统计报表的显示、查询和打印输出;计划/实际运行图的显示。

2) 列车运行实时监视和历史查询。铁路局 TDCS 利用基层网提供的信息,通过表示屏/背投及高分辨率显示器,为调度员提供调度区段内行车信息的细景,显示所辖区段内车站和区间列车运行信息,并在有关终端显示车次号跟踪

信息。

显示终端用于显示详细站场。站场显示可随意缩放,并可根据实际需要同时显示调度区段内所有车站或某一车站。调度台的显示范围除本调度区段所辖车站站场外,还可显示相邻调度区段的相邻车站和区间信息。

历史查询的主要功能为列车运行回放。回放时,如果本地没有需要的数据文件,系统可自动从应用服务器调取相应数据,并在本机保存、回放。

3) 列车追踪。系统可根据列车的运行状况和信号设备状态对列车车次号进行自动跟踪,并利用无线车次号系统自动校核车次号。

(2) 列车调度指挥。列车调度指挥在铁路局级主要包括运行图管理、调度命令管理、车站自动报警等功能。

1) 列车运行图管理。列车运行图的管理主要包括基本运行图维护、阶段计划的生成及自动调整、实际运行图的绘制、行车计划下达到车站、操作与数据记录等功能。

阶段计划的生成以日班计划为基础,并结合列车运行实际进行编制。阶段计划既可自动铺画,也可由调度员人工修改。系统根据列车的自动采点,自动描绘实际列车运行线,并生成实绩列车运行图。

列车运行滚动计划调整是以实际运行图和日班计划为基础,系统根据运行条件的变化和实际需要,综合考虑列车等级、区间运行方向、区间同向跟踪、股道利用、运行间隔、区间封锁等情况,并根据预先设定的最大正点率、最大通过率、最大运能等策略,对列车运行时刻进行相应调整。经调度员确认后,调整计划通过网络自动下达到车站。

系统提供自动调整和人工调整两种方式。自动调整全面考虑列车的实际运行状况和人工设定的各种条件,在充分利用区段通过能力的基础上,自动调整站停时分、运行时分、会让策略、折返作业处理等,给出列车运行的最优方案。人工调整是指调度员可随时通过人工编辑的方法修改阶段计划,达到列车运行调整的目的。人工调整主要包括站停时分调整、增减列车、列车始发站变更等。

2) 调度命令功能。调度员可通过系统网络和相应设备向车站、机务段、车务段等已安装 TDCS 终端的站段随时发布调度命令,对于已安装调度命令无线传输设备的区段和机车,调度员可以直接向机车发送命令。

3) 车站自动报点。列车到发时分是绘制运行图的基本数据,也是统计运行早、晚点的依据。TDCS 在车次号自动跟踪的基础上,实现了自动报点功能。根据进路条件,车次号信息处理区可分为列车通过和到发两种情况:当列车到达时,列车尾部驶入车站股道后,设备自动记录该时刻并加上相应的附加时分作为列车到点;当列车出发时,将列车头部驶出车站股道时刻减去相应的附加时分作为列车出发点;当列车通过时,则将列车尾部驶入车站股道的时刻和列车头部驶出车站股道的时刻的两者平均值作为列车的通过时间。当列车经过采点处时,自动将当前列车通过、到、发某点的时分与图定时分比较,并将早、晚点时分加于列车车次后部显示。

4) 仿真培训功能。铁路局 TDCS 提供了培训台。在调试阶段,可在线进行仿真调试;在开通使用过程中,可以作为模拟调度台对调度所各级行车指挥人员进行岗位技术培训。

4.2.3.3 基层网 TDCS 主要功能

基层网 TDCS 主要涵盖了列车运行监视和列车调度指挥、系统维护管理 3 个方面。以下主要介绍列车运行监视和列车调度指挥两个方面的重点功能。

(1) 列车运行监视。基层网 TDCS 列车运行监视主要包

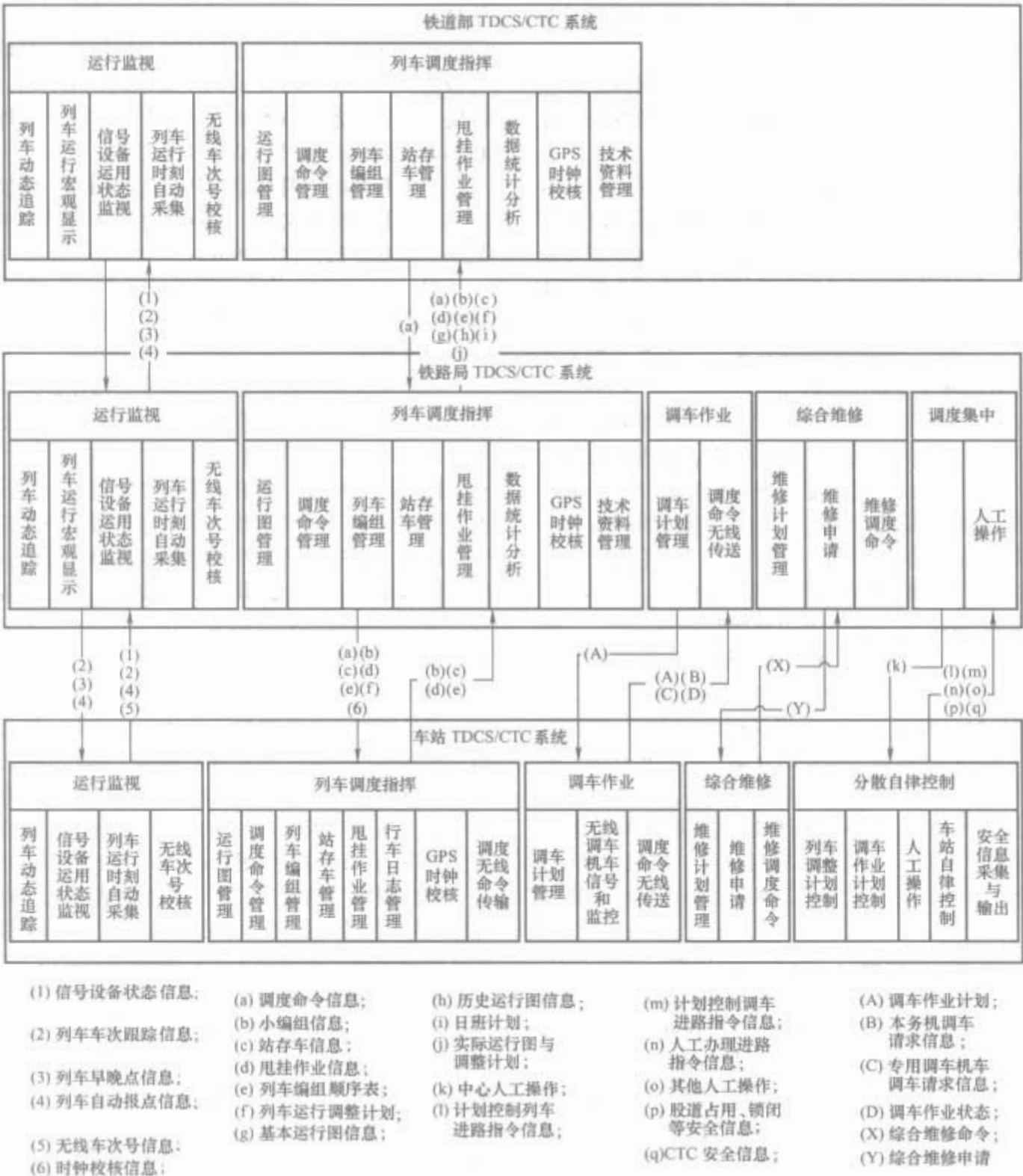


图 2.6-91 TDCS/CTC 三级间的数据结构和信息流向

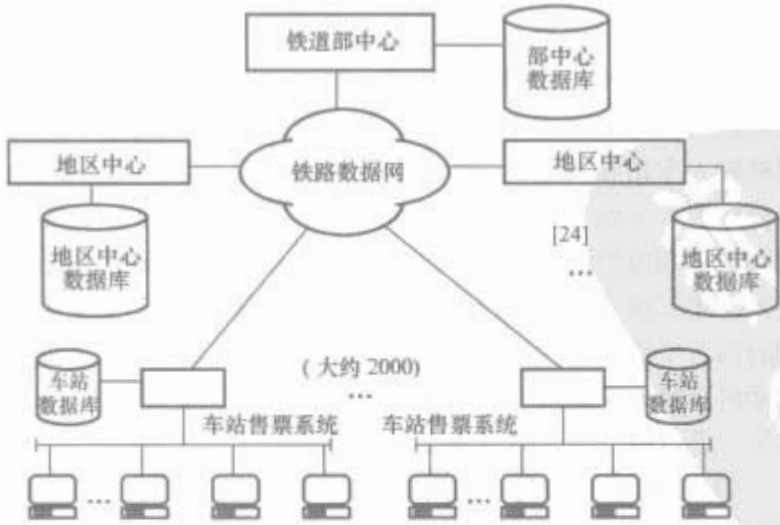


图 2.6-92 客票系统的组成结构

括信息采集和传送、无线车次号校核、车次跟踪及自动报点等功能。

1) 信息采集和传送。信息采集通过车站分机，采集现场动态信息。同时，通过传输设备将信息及时发送到铁路局 TDCS 中心。

2) 无线车次号校核。无线车次号校核是将车载列车运行监控装置提供的与车次有关的信息发送到车站无线列调设备，再送到 TDCS 系统基层网设备。无线车次号信息发送分为列车始发、列车进站和列车出站 3 部分。

3) 车次跟踪及自动报点。车站分机可通过列车占用和出清轨道电路的变化状态，实现对列车车次的自动跟踪，列车的自动报点及显示列车早、晚点时分。

(2) 列车调度指挥。基层网 TDCS 列车调度指挥主要包括阶段计划签收和打印、车次和到发点的人工管理、站间透明、调度命令管理、行车日志管理、现在车管理、甩挂车作业和列车速报表等功能。

1) 阶段计划的签收和打印。当调度中心向车站发送调度命令时，阶段计划签收按钮闪烁并伴有声音报警，表示收到阶段计划，车站值班员应进行签收。车站调度员对调度员手工下达的阶段计划签收，并可查询和打印。签收后的阶段计划即可在行车日志上显示。

2) 车次和到发点的人工管理。在始发站，车站值班人员通过值班员终端输入列车车次。TDCS 具有软件车次跟踪

功能,能够根据轨道电路状态的变化实现车次号的自动传递。TDCS 终端提供了修正车次号的手段,允许值班员通过终端设备输入、更改列车车次号;车站值班员可进行人工报点或修正。

3) 站间运行状态处理。TDCS 通过车站值班员终端为车站值班员显示区间信号的开放状态及列车在区间的运行情况,使值班员掌握区间列车的运行位置和速度等信息。除显示区间信息外,值班员终端还显示邻站信息及上、下行方向列车接近车站的实时信息。

4) 调度命令管理。车站值班员可对调度命令进行接收、签收、存储、查询和打印。基层网 TDCS 可将调度员拟写的调度命令、车站值班员拟写的行车凭证通过无线通道发送到机车。车站值班员终端判断选择合适时机进行命令发送,并具有命令发送、回执检查、自动重发、报警提示等功能。

5) 行车日志(运统二、运统三)管理。基层网 TDCS 自动生成的列车到站、出发时间,列车车次、到发点、占用股道等信息送到终端显示,并根据日班计划和上述的信息实时生成运统二或运统三表格。表格中无法自动生成的项目可由值班员填写。

6) 现在车管理。车站值班员可在车站 TDCS 终端输入站存车、现在车等车站运用车信息,该类信息包括存车股道、车辆类别和辆数、车辆去向和说明。

7) 甩挂车作业和列车速报表。车站值班员可接收调度员下发的列车甩挂车信息,并可存储和查询。车站值班员可输入列车速报表,用于调度员的行车指挥,以及运行图和统计报表的绘制和打印。

4.2.4 信息流

TDCS/CTC 系统是复杂的网络信息系统,CTC 在 TDCS 基础上构建,两者密不可分。CTC 区段除具备 TDCS 系统的全部功能外,还增加了 CTC 功能和设备。根据 TDCS/CTC 系统的应用领域和业务特点,其总体数据结构可按列车运行监视、列车调度管理、系统维护管理、调车作业管理、综合维修管理、分散自律控制 6 部分描述。

TDCS/CTC 三级间的数据结构和信息流向如图 2.6-91 所示。

4.3 铁路客票发售及预订系统

铁路客票发售和预订系统属铁路客运管理自动化系统。客运管理系统主要包括客票发售和预订自动化、行包管理自动化、旅客信息服务 3 个子系统。行包管理自动化系统主要是以旅客快捷、简便的方式托运、取回行李包裹为目标。系统包含行包受理、查询及交付等功能。信息服务系统主要是为了方便旅客乘车、进出站,使旅客在车站及列车上能够快速而大量地获得各种信息,包括车站内旅客列车到发时刻、停靠站台、车站内部配置查询、问询系统,以及列车上的信息发布、旅游信息查询等旅客服务功能。

客票发售和预订自动化系统主要是为旅客方便、迅速地购买所需车票而设计,可实现旅客异地购买车票、退票、查询等用户功能;同时还可实现铁路客运业务管理与统计功能。可对旅客以电话、传真、互联网等多种形式预订车票给予识别和认可是系统最大的特色。以下仅介绍我国铁路客票发售和预订系统。

4.3.1 系统功能

系统主要功能包括:

(1) 实现全路快车营业站计算机联网售票,以机器代替

人工作业,以软票替代常备客票,在任一售票窗口可发售任意方向和任意车次的客票。

(2) 可预订、预售和发售当日客票,具有售返程、联程等异地票功能。

(3) 实现票额、席位、计费、制票、结算、统计等工作的计算机管理。

(4) 实现客票信息共享,加强管理与分析,提高席位利用率,为铁路客运组织与管理工作提供辅助决策支持。

4.3.2 系统结构

我国铁路客票发售和预订系统由车站售票系统、地区客票中心、铁道部客票中心 3 级构成,其组成结构如图 2.6-92 所示。车站售票系统是面向售票的实时交易服务环节;地区客票中心主要是面向座席的客运业务管理环节;铁道部客票中心主要是面向营销和保障的宏观控制部门。

售票网主要由骨干网、沿线网、市区网 3 部分组成。骨干网连接铁道部客票中心和地区客票中心;沿线网连接地区客票中心和客运车站;市区网连接城市内的车站、售票窗口及代售处。上述网络采用了铁路光缆、分组交换网 X.25 和铁路电话专线等。

系统建立一个覆盖全国铁路的计算机售票网络,实现计算机联网售票和异地售票,票额、席位、计费、制票、结算、统计等工作的计算机管理,客票信息共享和客运营销分析,推动了远程代售、自动售票、电话订票、网上订票、自动检票、列车补票、余额显示、旅客查询、媒体信息发布等多种售票服务方式的发展。

4.3.2.1 车站客票系统

车站客票系统主要完成旅客售、退、订票服务,实现了以计算机替代人工作业,以即输即印的软纸票替换常备客票,通过人机界面实现多车次、多到站、多票种、多席位售票处理。在任一售票窗口可发售任意方向和任意车次的客票,既能发售和预订普通车票,也能办理通票、中转签字票、始发签字票;既能适应本地售、订、退票,也能适应异地售、订、退票。

车站客票系统对车站售票作业实行管理,包括售票员、售票窗口的管理、票额分配计划管理、票额调度、余票管理、售票车次和票价的监管、通票经路管理、印票纸管理、售票安全管理,还包括售票员结账管理、财收和客运统计等。

4.3.2.2 地区中心客票系统

地区中心系统的主要职责是管理地区内始发和通过车次的票额。系统根据列车沿途各站上车人数进行票额分配。其分配模式可分为 3 种:一是票额集中生成集中发售,即系统根据票额分配计划,在中心服务器生成所辖车站席位库,并在网上发售;二是票额集中生成分散发售,即在中心生成席位库,并在网上先行发售,根据车站的需要定时将席位自动返至车站,由车站发售;三是分散生成,分散发售,即系统提供了为车站编制票额分配计划和将计划下载到车站,车站在中心下载计划的范围内配额分配计划。

系统还提供了值班监控、基础数据维护、计划管理、调度命令管理、售票情况查询、票额动态调度、客运营销分析等功能,保证票额分配满足旅客的需求。

4.3.2.3 铁道部客票系统

铁道部中心系统的主要功能是基础数据维护、客运营销分析和支持客运清算。需维护的基础数据分成路网信息、车次信息和票价信息,其中与车次有关的基础数据归地区中心

维护;与车次无关的基础数据由铁道部统一维护。各类基础数据最终集中于铁道部数据库,经复制送至各地区中心,再从地区中心复制到各联网车站的数据库,从而保证了数据维护的权威性、数据的一致性和数据源的唯一性。

基于数据库理论开发的营销分析系统,将客票系统业务操作产生的数据每天自动地逐级进行收集和整理,按照客运运输主题在车站、地区中心和部中心进行数据的组织和存储,使用统计预测和数据挖掘工具进行深层的数据分析,给领导提供决策支持。

4.3.3 系统关键技术

系统间的联系由复制服务器、数据库通信程序(DBCS)和连接管理服务器(CTMS)构成,各自分别支持复制、连接管理和传输。

为保证系统基础数据的一致性,铁道部中心作为基础数据维护的唯一数据源,所有基础数据均由此复制到24个地区中心,再复制到24个中心所管辖的联网车站。路局地区中心设有维护库,用于维护各路局管内车次,维护数据通过部中心复制到各地区中心和相关车站的运行库。同时,铁道部的基础数据和直通车次数据由部中心复制到各中心运行库。如果铁道部数据发生变化,各中心和车站的数据也将随之变化。

CTMS是为客票系统实现分布访问控制而自行开发的中间件产品。旅客购票时,客户端首先发送请求到车站CTMS,车站CTMS检测请求是到本站还是到地区中心。若请求是到本站,则建立客户端与车站数据库的连接。若到地区中心,则发送请求至地区中心。地区中心的CTMS检测请求,若是到本中心,则建立客户端与本中心数据库的连接,否则发送请求至其他地区中心。同理,如需要查询地区和车站的数据,客户端发送请求到铁道部的CTMS,部中心CTMS建立与其他地区中心或车站之间的连接。

数据库通信程序DBCS提供客票系统分布数据库之间的数据自动交换。交换的数据主要包括计划、席位、调度命令、存根和统计数据等,所有数据交换均采用加密和压缩技术。

4.3.4 系统数据组织

4.3.4.1 客票系统基础数据

各级应用系统运行所需的客运基础信息主要包括铁路路网及行政管理信息,列车运行图信息,票价计算信息,以及系统运行所需的参数信息。在上述信息的建立与维护中,包括了相关代码的定义。

4.3.4.2 票额计划和调度命令数据

计划与调度数据主要包括票额长期计划、临时计划和车站基本计划,旅客列车加开、停运,车辆加挂、甩挂等调度命令,席位的动态调整,以及编制计划和生成席位库所需的参数定义。

4.3.4.3 席位数据

售票系统的核心是票额控制及席位的运用管理,席位库表在客票系统中极为重要,并且访问频繁。车站售票窗口对座席数据的访问具有随机性和较强的实时性;在客票发售和预订期间内,席位数据可随时修改、更新。

4.3.4.4 存根数据

存根数据是指售票、订票、退票业务的记录信息。该信息不仅反映售票工作的实绩,而且是财务结算和统计分析的依据。发售、预订、退票的存根信息,实时存储在车站服务器。售、退票存根定时批量传送给地区中心服务器,并进行席位使用状态和席位复用处理。

4.3.4.5 统计数据

统计数据包括客运统计和财务统计。车站基本上是根据存根进行售、订、退票的结账和财务统计,依据席位库进行客运统计的。地区中心客运和财务统计数据的生产依据车站传到地区中心的存根数据汇总整合,逐级上传,形成客运营销分析系统的统一数据源。

4.3.5 系统平台配置

4.3.5.1 车站系统

车站系统由双机服务器、磁盘柜、网络设备、售票机、退票机和管理机组成。售票机接制票机,退票机接扫描仪,管理机接打印机。上述设备通过局域网相连,市内代售点多通过电话网连接。

4.3.5.2 地区中心系统

地区中心系统由双机服务器、磁盘柜、网络设备和管理机组成,并上与铁道部客票中心相连,下与车站相接。其管理机包括客票中心的管理机,以及路局和收入部门的管理机。

4.3.5.3 铁道部中心系统

铁道部系统包括运行系统和技术支持系统。其运行系统由双机服务器、磁盘柜、网络设备和管理机组成。运行系统平级和清算中心相连,并配备了数据仓库服务器。向下与各地区客票中心相连,网络采用一主二备,一主是指2Mbit/s的光缆,二备是指X.25和PSTN网。技术支持系统建有铁道部3级模拟环境,覆盖了客票系统所用全部机型,适用于各种情形下的模拟试验,为系统升级提供了完善的测试环境。

4.4 综合自动化系统(综合监控系统, ISCS)

轨道交通系统综合自动化系统是指各专业机电自动化系统采用统一的计算机硬件和软件平台,以协同行车指挥与列车运行行为总目标的集成监控系统。

轨道交通客运业务主要由运营调度、车辆、供电、通信信号、环控与防灾、售检票等业务部门组成,各自动化系统相互衔接,各业务部门协同运作,是保证行车安全、高效运行的重要前提。而ISCS系统是以行车指挥与列车运行监控业务为核心,完成各业务链的集成与协调,可最大限度地调动轨道交通系统内部各专业、各种设施,乃至不同营业线业务系统间、相关交通系统业务间协同运作的功能。

目前,ISCS系统已由各机电自动化子系统间简单的机间联系,发展成为各机电自动化系统的统一管理、集中监控、资源共享的复杂大系统。

综合自动化系统在国内也称作综合监控系统(Integrated Supervisory Control System, ISCS)或主控系统(Main Control System, MCS)。

4.4.1 ISCS的功能

ISCS设置统一的硬件和软件信息共享平台。在此共享平台上,集成和互联了必要的系统,实现集中监控和系统之间信息共享和协调互动等ISCS主要功能。

4.4.1.1 集中监控功能

主控系统通过对车站主要机电系统的集成,实现对城轨行车指挥与运营、防灾、安全和乘客服务等相关信息的集中监控功能,它主要包括:

- (1) 电力监控的遥控、遥信、遥测和遥调功能。
- (2) 火灾报警信息的监视功能。
- (3) 车站环境参数的监视功能、车站环控设备和隧道通风设备的监控功能。
- (4) 屏蔽门和防淹门设备运行状态的监控功能。
- (5) 客流信息和自动售检票设备状态信息的监视功能。

- (6) 在线列车实际位置的实时监视功能。
- (7) 与运营相关的车站显示和车载显示系统信源的编辑功能。
- (8) 广播系统的播出控制功能。
- (9) 闭路电视监视画面的切换功能。
- (10) 中央大屏幕的全线监视功能。
- (11) 车站控制室的后备紧急控制功能等。

4.4.1.2 协调互动功能

通过 ISCS 集成平台，ISCS 实现了相关机电系统之间的信息共享和协调联动的功能，主要包括：

- (1) 正常运营时各相关系统的协调联动功能。
- (2) 火灾发生时各相关系统的协调联动功能。
- (3) 列车阻塞时各相关系统的协调联动功能。
- (4) 人为或自然灾害等突发事件发生时的协调联动功能。
- (5) 相关系统发生重大设备故障时相关系统应急处理协调联动功能等。

4.4.2 系统构成模式

综合自动化系统按技术发展的历程，可分为传统集成模式、控制中心集成模式及现代集成模式 3 种类型。上述 3 种模式在国际上均有运用实例。

4.4.2.1 传统集成模式

各机电系统分立存在，通过处于控制中心的机电系统之间的接口建立联系，并通过增设的信息处理系统及综合调度

信息中心构成。其构成如图 2.6-93 所示。

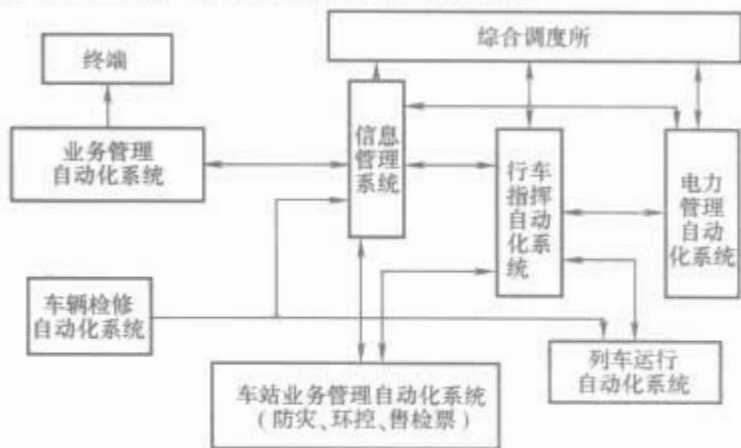


图 2.6-93 传统综合监控系统 ISCS (综合自动化系统) 构成

该系统构成模式为综合自动化系统的初期阶段构成方式。

4.4.2.2 控制中心系统构成模式

设于控制中心的各机电系统总机的全部或部分集成，形成控制中心系统构成模式。通常，信号系统中心 ATS、自动售检票、防灾系统不纳入集成系统之中；而站段（场）的各机电系统维持原分立状态，通过网络接口、骨干网与控制中心系统共同构成系统。控制中心系统构成如图 2.6-94 所示，图中 ISCS 服务器为集成系统共用服务器。

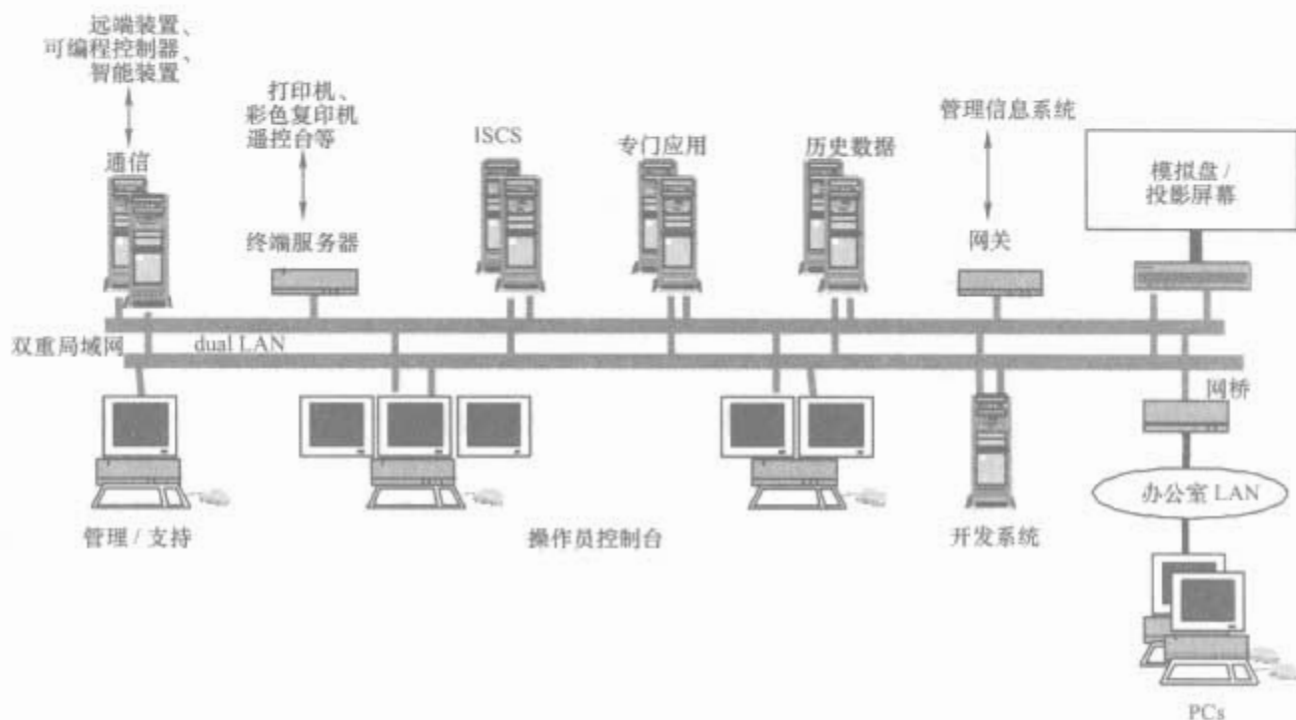


图 2.6-94 控制中心集成方式的综合自动化系统

4.4.2.3 现代集成模式

该模式是目前国内外普遍推行的模式，其控制中心、站段（场）机电系统的构成基本打破各机电自动化系统分立构筑的模式，形成统一的业务平台，实现机电系统的集中监控与协调。集成系统可以将信号、防灾等系统纳入或与之互联。图 2.6-95 所示为广州地铁采用的综合自动化系统实例。

4.4.3 主控系统 (ISCS) 硬件构架

主控系统总图 (OCC/典型车站/车辆段) 总图构成如图 2.6-95 所示。主控系统硬件由主控骨干网 (MBN)、中央主控系统 (CMCS)、车站主控系统 (SMCS) 和车辆段主控系统 (DMCS) 等组成。

主控骨干网是一个地理上分散于 OCC、各车站和车辆段的网络，通过主控骨干网连接中央局域网和站级局域网，

实现网络信息传输。通常，骨干网为千兆以太网。站段（场）局域网为 100/10Mbit/s 网，中央局域网为 100/1000Mbit/s 网。

中央级主控系统 (CMCS) 位于 OCC，CMCS 是以中央局域网为基础。中央配置的冗余实时和历史服务器、各调度员终端、前端处理器 (FEP)、大屏幕 (OPS) 等设备皆通过以太网接口接入中央局域网络，通过骨干网收集各站点上传的监控信息和向各站点下达相关的控制命令。

车站级主控系统 (SMCS) 位于车站。SMCS 以车站局域网为基础，配置的冗余实时服务器、车站值班工作站、前端处理器 (FEP) 等设备，通过以太网接口接入车站局域网，通过骨干网向中央上传本站的监控信息和接收中央下达的控制命令。车站控制室设置综合后备盘 (IBP)，在紧急

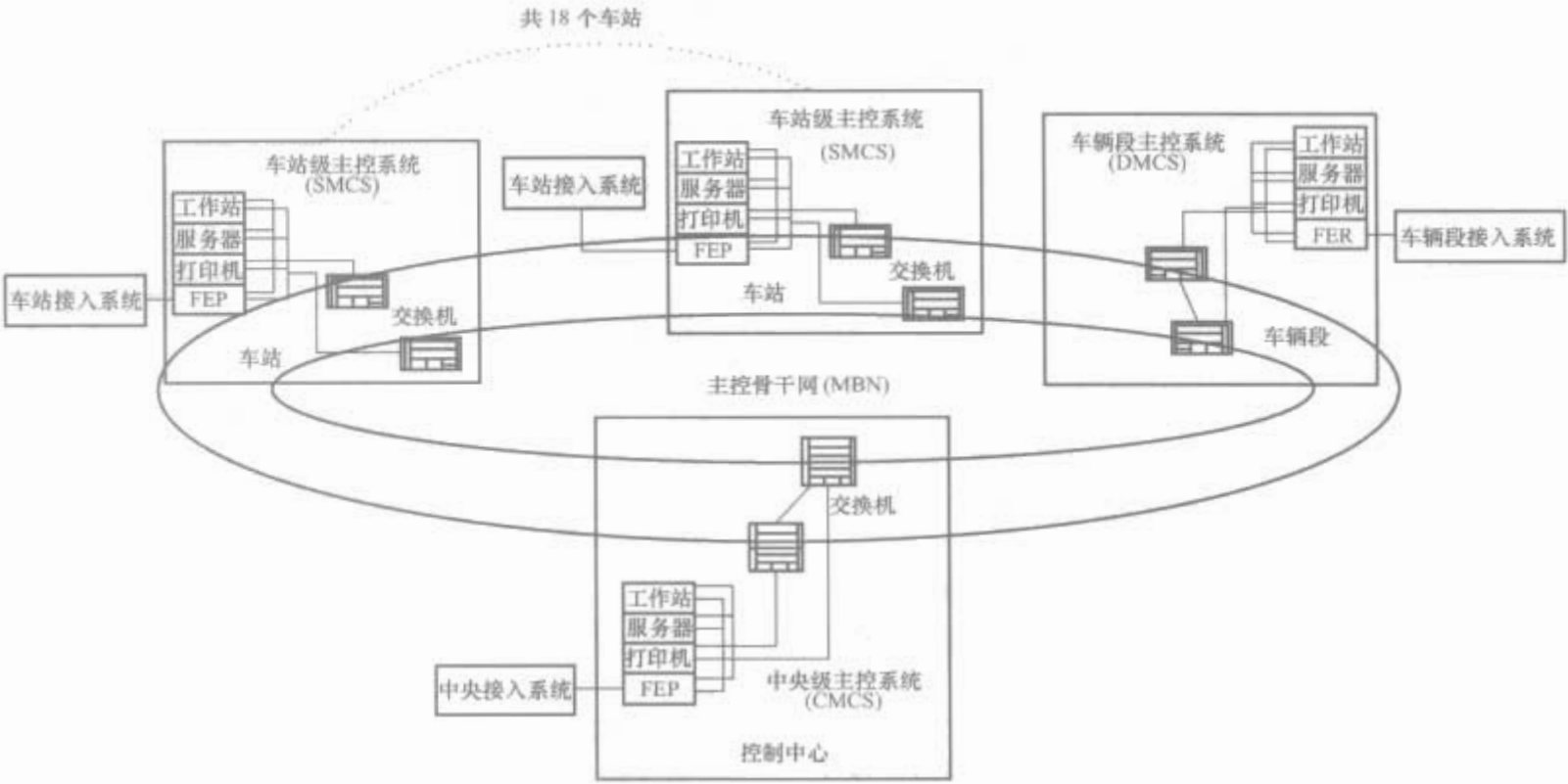


图 2.6-95 主控系统总图构成示意图

情况下，车站值班人员可通过 IBP 盘实现对本站关键设备的紧急后备手动控制。系统服务器可选 UNIX 或 Windows NT，工作站选 Windows NT。全系统具有较强的开放性，可提供 ODBC、OPC 接口。

车辆段主控系统（DMCS）位于车辆段，DMCS 以车辆段局域网为基础。车辆段作特殊站点，其硬件配置与车站类似。

接入系统多是 ISCS 的特点。接入系统的集成是指将接入的子系统的全部信息均由 ISCS 传输，集成系统的车站级和中央级的功能由 ISCS 实现，集成系统可不具备单独的信息传输网络；接入系统互联则是接入的系统具有自己的单独的信息传输网络，自身是一个独立系统，可脱离 ISCS 独立工作。互联系统只是将运营所需的信息传至 ISCS，从而实现必需的各系统之间的信息互通和协调互动功能。监控中心局域网可直接接入第 3 方系统；骨干网的路由交换机端口可接入第 3 方局域网；子系统高速以太网的交换机端口可直接接入第 3 方服务器；子系统高速以太网可以通过网关接入第 3 方控制网络；子系统的各控制网络中可以在通信控制器挂接 RS232、RS485 等串行总线，也可以在 Arcnet、Profibus-DP 总线上接入第 3 方 PLC，第 3 方控制器在子系统高速以太网上可以直接接入第 3 方子系统。

主控系统集成系统通常包括变电所自动化系统（PSCADA）、火灾自动报警系统（FAS）、机电设备监控系统（EMCS）、屏蔽门系统（PSD）、防淹门（FG）。互联系统可包括广播系统（PA）、闭路电视系统（CCTV）、车载信息系统（TIS）、乘客信息显示系统（PIDS）、自动售检票系统（AFC）、信号系统（SIG）、时钟系统（CLK）等。完整的 ISCS 系统可形成以行车指挥与列车运行为核心的机电系统一体化系统。

由于各接入系统与主控系统的通信协议难以保证完全统一，ISCS 专门配置一对冗余的前端处理器（FEP），用于各接入系统的数据隔离及协议转换功能。FEP 按照接口规定的、开放的、软件解码的软件协议，如 MODBUS/TCPIP 和 IEC 60870-5-104 等开放协议，将不同格式的实时数据转换成 ISCS 内部统一格式数据，再上传至 ISCS 的车站和中心服务器处理和存储，同时将主控系统下达的命令解析成各相

关系统理解的格式，下发到各接入系统。

4.4.4 系统软件

ISCS 选用大型数据采集与监控软件作为 ISCS 的核心软件。该大型数据采集与监控软件处于整个地铁自动化顶层，是一个功能丰富、结构复杂的大型 SCADA 软件。该软件核心内核可根据业主需求，易于移植。

ISCS 软件集成平台采用“UNIX+WINDOWS XP+VXWORKS”软件架构，即实时服务器及历史服务器的软件平台选用 UNIX 平台，操作员工作站人机界面软件采用 Windows XP 平台，前端处理器 FEP 主要完成与不同子系统的数据库转换与信息交互，要求实时快速、简单可靠，采用嵌入式系统软件平台 Vxworks。

ISCS 采用模块化的软件设计架构、CORBA 中间件的软总线、模块化软件构架等技术，使软件内核之间的结构清晰，接口明确，易于完成 I/O 服务、报警服务、历史趋势服务、列表服务、报表服务等软件的分布式服务，进行软件移植与应用开发，以及软件故障诊断。采用 CORBA 中间件的软总线技术，通过中间件屏蔽了通信底层接口的复杂性，易于实现跨系统平台（UNIX 系统、Windows XP 系统）、跨网络及硬件的软件通信，使应用程序的内部数据流更清晰，各种服务与客户端之间可以更方便地交互所需要的数据。

ISCS 软件的人机界面采用 ANIMATOR 图形软件。ANIMATOR 支持高实时性要求的各种图形显示，支持动画处理，可按照图形类的方式处理各种图形对象，可直接支持 AutoCAD 格式的电子文件图形；支持矢量化、高比率的图形无级缩放功能等。

4.4.5 现场设备控制

ISCS 要求在车站级有较大的集成度，接入多个专业子系统，需要有极高的可靠性和响应性。ISCS 选用集散系统 DCS 作为车站级现场设备的控制。集散系统（DCS）的基本构成如图 2.6-96 所示。

DCS 的基础自动化层由现场控制站 FCS、PLC 等控制器、I/O 站和控制网络组成，实现现场设备的分散控制。即使网络故障，现场控制站依旧可以控制现场设备，实现了可靠、安全的分散控制。

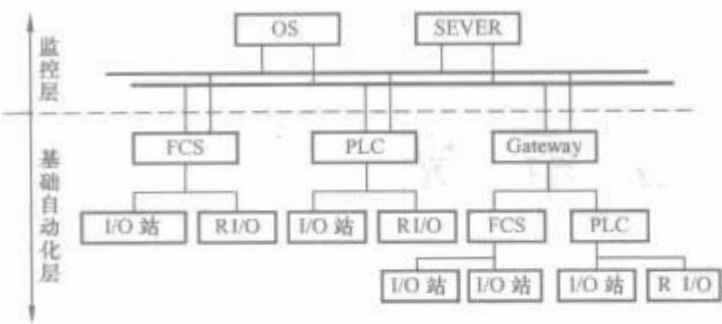


图 2.6-96 集散系统 (DCS) 的基本构成
OS—操作员站；SEVER—服务器；FCS—现场控制站；
PLC—可编程控制器；Gateway—网关；RI/O—远程 I/O 站

DCS 的监控层由服务器和操作员站组成，实现局域网范围的集中管理。DCS 的系统构成原则上成为当代工业自动化系统的主要构成原则，已在工业领域中广泛应用。

4.4.6 系统的主要技术指标

ISCS 系统主要技术指标见表 2.6-29。

表 2.6-29 ISCS 系统主要技术指标

项 目		指 标
系统可靠性 指标	系统可利用率(%)	≥99.99
	系统平均修复时间(h)	<0.5
系统实时 响应性	回路控制周期(ms)	最小 50
	逻辑控制周期(ms)	最小 50
	实时数据扫描周期(ms)	最小开关量 50

续表

项 目		指 标
系统实时 响应性	模拟量(ms)	50
	实时画面响应时间(s)	≤0.5
	底层至顶层数据 传输周期(s)	≤2
系统配置 能力	骨干网节点数	48,63,127(以选型而定)
	子系统节点数	63 或更高档(可选)
数据处理精度 典型值	PSAS 的保护数据精度(%)	≤0.5
	PSAS 的测量数据精度(%)	≤0.2
数据处理精度	模入精度(%)	大信号小于或等于 0.1; 小信号小于或等于 0.2
	模出精度(%)	≤0.2
	模拟量时间戳记录精度(s)	秒级
	开关量时间戳记录 精度(ms)	毫秒级
SOE 分辨率	站内(ms)	≤1
	站间(ms)	≤2
	PLC 每 K 语句 处理时间(ms)	0.2(最小)



第7章 磁浮交通系统

1 概述

1.1 基本概念

磁浮列车是一种新型的陆上交通运输工具,其最大的特点是磁浮车辆取消了传统车辆的车轮,从而实现了磁浮列车非黏着牵引的非接触运行。

传统的轮轨式机车车辆的支承力和导向力由车轮与轨道的机械接触产生,牵引力通过轮轨之间的黏着现象产生;而磁浮车辆的支承力和导向力则由车辆与轨道之间的电磁吸力或斥力产生,牵引力由直线电动机产生。所以磁浮列车运行时与轨道没有机械接触,称为非接触运行。直线电机的牵引力无需通过黏着现象产生,也不会受到轮轨系统中的接触黏着的限制,故把这种牵引方式称为非黏着牵引。

虽然磁浮列车在运行时不与轨道发生机械接触,但仍要受到轨道的约束,只不过是约束的方式不同,所以它具有轨道交通系统的基本特征。人们把车辆的支承力、导向力和牵引力由磁力产生且以非接触方式运行的轨道交通系统称为磁浮交通系统。

1.2 发展历程

磁浮交通是人类不断追求高速度的产物。以铁路为标志的现代轨道交通诞生于19世纪初,从第一条铁路投入商业应用到目前为止,轮轨列车的运营速度并未发生本质的变化,不过300km/h左右。制约轮轨列车速度提高的根本原因是“轮轨关系”。于是,自20世纪初,人们就开始探讨摆脱限制列车速度的途径。“磁悬浮”的概念就是在取消轮轨关系,实现非接触运行的基本思路下提出的。1922年,德国人赫尔曼·肯佩尔(Hermann Kemper)提出了电磁悬浮原理,从而摆脱轮轨关系,并在1934年获得世界上第一项关于磁浮技术的专利(DRP NO. 643316)。1953年他发表的“电子悬浮导向的电力驱动铁路机车车辆”提出磁浮铁路的设想。但由于技术条件的限制,直到20世纪60年代,磁浮交通系统的应用技术研究才真正开始。

1.2.1 德国磁浮交通技术的发展历程

德国是世界上最早研究磁浮交通技术的国家之一。1969年,德国联邦交通部、联邦铁路公司和德国工业界参与了“高速与快速铁路研究”,它包括高速轮轨铁路和高速磁浮铁路。

经过多方案的比较之后,德国联邦研究与技术部决定集中力量发展长定子直线同步电机驱动的EMS(Electro Magnetic Suspension,电磁吸力悬浮)型磁浮交通系统。

1979年,德国在汉堡国际交通展览会上顺利展出的TR05磁浮车在900m的线路上按运行时刻表运送了约5万名参观者,时速为75km/h。

随后,德国决定在埃姆斯兰地区建造大型试验设施(简称TVE)。第一期工程包括21.5km试验线路、试验中心和TR06试验车,该试验设施于1983年6月30日投入试验运行。为了提高试验速度,1984年开始扩建南环线,至此埃姆

斯兰试验线全长31.5km。1988年,TR06的试验速度达到412.6km/h。1986~1989年,由蒂森公司牵头,研制了面向应用的TR07高速磁浮列车。1991年底,德国做出TR高速磁浮铁路系统技术已经成熟的结论。1993年,TR07型磁浮列车在TVE上达到450km/h的试验速度。

1997年4月,德国政府决定建造柏林—汉堡高速磁浮铁路(292km),开发了TR08型磁浮列车,该车于1999年10月开始在TVE上进行了试验。后来,由于经济的原因,该建设计划被取消。

1.2.2 日本磁浮交通技术的发展历程

日本在研究开发高速磁浮交通技术的同时,还发展了低速磁浮交通技术。

1.2.2.1 高速磁浮交通系统

日本国家铁道协会(简称国铁,JR)于1962年开始研究高速磁浮交通技术。选择了超导电动斥力型高速磁浮列车的技术路线。

1972年,超导磁浮试验车“LSM200”成功地实现了悬浮行驶。1975年,开始在九州半岛上的宫崎附近建造试验设施。1977~1979年,7km长的宫崎试验线分阶段投入使用。1979年2月,ML500型磁浮列车不载人运行速度达到517km/h,创造了当时世界铁路运行速度的最高纪录,而且证明有可能将磁浮系统的长定子直线同步电机驱动技术用于高速有轨交通系统。由于宫崎试验线没有坡道和隧道,不能满足接近应用条件的试验要求,因此,日本运输省决定建设新的超导磁浮列车试验线,即现在的山梨线。宫崎试验线于1996年10月关闭。1989年夏,日本运输省决定在山梨县建设全长为42.8km的高速磁浮列车试验线。1991年开始建设,到1997年4月,18.4km的区段先行投入使用。山梨试验线除包括18.4km的线路外,牵引变电站、试验中心和两列磁浮车(MLX01和MLX02)。1997年12月24日,3辆编组的MLX01型磁浮列车不载人试验运行速度达到550km/h,创下了新的世界纪录。1999年4月,5辆编组的MLX01型磁浮列车实现了552km/h的载人运行速度;同月,MLX型磁浮列车在山梨试验线上创造了高速磁浮列车相对速度为1003km/h的会车世界纪录,两列车的速度分别为546km/h和457km/h。2003年12月2日,MLX01型磁浮列车的载人试验速度达到了581km/h,又创造了新的世界纪录。

1.2.2.2 日本的中低速磁浮交通系统

日本在发展高速磁浮铁路的同时,还研究开发了中低速磁浮交通系统。因为非接触运行的磁浮列车除了可以方便地实现高速度外,其噪声低、加减速快、爬坡能力强等优点在城市轨道交通运输中也极具竞争力。

日本航空公司为延伸服务,于20世纪70年代初从德国引进原始技术开始投资开发HSST(High Speed Surface Transport)系统,希望用于连接机场和市区。虽然当时将其称为“高速地面运输系统”,但实际是一种中低速地面交通运输系统。

从1975年的HSST-01型到1989年的HSST-05型,5款磁浮车辆的成功运行说明该系统基本达到接近应用的水

平。日本于1991年建成了位于名古屋附近的大江试验线(1.53km), HSST-100S型磁浮列车开始运行试验, 其最高试验速度达到130km/h。2005年3月, 在日本爱知县举行的世界博览会期间, 投入运行HSST-100L型磁浮列车。该线全长9.2km, 复线, 其中运营线路8.9km。列车为3辆编组, 最高运行速度为100km/h, 单程运行约为15min。至此, HSST系统真正走向商业应用。

1.2.3 其他国家发展磁浮交通技术概况

1.2.3.1 英国

1974年, 英国在德比进行了磁浮列车运行试验, 试验车长3.5m, 质量为3t, 线路长100m。

为了将新建的伯明翰机场与国际展览区及火车站连接起来, 英国建造了一条620m长的低速磁浮铁路, 该线路于1984年投入载客运行, 列车速度可以达到50km/h。由于其故障率高、维护困难等原因, 该系统于1996年关闭。

1.2.3.2 美国

美国从20世纪60年代初开始研究磁浮交通技术, 率先提出采用低温超导磁体技术的电动斥力悬浮(Electrodynamic Suspension, EDS)概念且获得专利, 该技术后来被日本所采用。

1975年暂停研究, 1989年提出国家磁浮起动计划, 重新评估磁浮交通的实用价值。历时4年, 优选设计出4种磁浮交通系统方案。这4个方案均是最高速度为500km/h的高速系统, 其中3种为EDS。同时, 还对美国16条城际线路进行了技术经济分析与评估, 认为只有纽约—波士顿一条线路能在短期内收回投资, 实现盈利。

从美国提出的几种技术方案看, 总的思路: 一是要减小悬浮导向的能源消耗, 提高系统效率, 如采用混合悬浮技术、永磁或超导电动斥力悬浮技术、同步电机驱动技术等; 二是应用目标为城际高速; 三是简化系统结构和技术的复杂性, Magplane(简称MP)方案就是其中的典型代表。

Magplane源自于美国斯坦福大学于1969年提出的“连续感应板”概念, 即利用车载磁体与轨道感应板相对运动产生感应电流, 从而在车辆和线路间产生电动斥力, 实现车辆悬浮。1972年, 美国麻省理工学院根据上述原理提出Magplane的概念设计, 同时建造了1:25的实验模型车和100m的线路。Magplane方案除采用永磁(用于中低速系统)或超导(用于高速系统)电动斥力悬浮原理和长定子同步电动驱动技术外, 还吸收航空和公路系统的设计理念, 如导航与转辙技术, 因此可以说Magplane突破了传统轨道交通和磁浮交通的设计思路。

除上述国家外, 加拿大、法国、苏联、瑞士、韩国、罗马尼亚等国都曾对磁浮交通技术开展过研究, 但由于种种原因停止或尚未达到应用水平。

1.2.4 国内发展历程

早在20世纪70年代, 我国的科技工作者就对磁浮交通新技术予以关注, 一些研究机构和大学逐步开展了基础性研究工作。进入80年代, 国防科技大学、西南交通大学和铁道科学研究院先后对磁浮列车悬浮原理和技术进行研究, 并取得一些关键性的进展。

西南交通大学从1986年开始研究磁浮列车技术, 1994年研制成功我国第一辆可载人4t磁浮车及43m试验线, 该成果于1996年1月通过科技成果鉴定。2001年1月3日, 世界上第一辆载人高温超导磁浮实验车在西南交通大学研制成功。2001年该校研制了CFC01工程试验样车及其试验线。该车长11.2m, 宽2.6m, 自重为18t, 载重为4t, 26

座, 设计最高速度为100km/h; 采用短定子直线异步电机牵引, 制动系统为电机电阻制动与液压制动相结合的混合系统; 列车采用自动运行控制和司机驾驶控制相结合的操作控制方式; 线路长420m, 最大坡度为20%, 最小平曲线半径为250m。线路轨道梁全部采用混凝土箱型梁结构, 采用交叉感应环线定位、测速和通信。

国防科技大学的磁浮技术研究工作始于1980年, 1995年研制成功单转向架磁浮车系统。2001年研制了CMS-03型试验车及204m试验线路。该车长15m, 宽3m, 可承载100人左右。每车由4个转向架组成。线路最小平曲线半径为100m, 最大坡度为40%, 最小竖曲线半径为1000m。

2000年6月, 我国上海市与德国磁浮国际公司合作进行我国高速磁浮列车示范运营线的可行性研究。同年12月, 我国决定建设上海浦东机场至龙阳路地铁站高速磁浮交通示范运营线。2001年3月1日正式开工建设, 2003年底完成竣工验收。该工程包括33km线路(其中正线30km)、两个车站、两个牵引变电站、1个运行控制中心和1个维修中心, 配置5节编组的TR08车辆3列, 列车设计最高运行速度为430km/h, 单向运行约8min, 发车间隔10min。

2 磁浮交通的分类与特征

2.1 分类

根据磁浮交通系统的用途和磁浮列车的实际运用速度, 参照轨道交通运行速度划分标准, 可以将其分为高速和中低速两种磁浮交通系统。

“高速”是一个相对的概念, 在不同领域、不同历史阶段, 高速的含义是不同的。在地面轨道交通运输领域, 不同国家和地区对高速的定义或理解也不甚相同。日本把速度超过200km/h的铁路定义为高速铁路, 这一概念被广为接受, 因为世界上公认的第一条高速铁路——日本东海道新干线(SHINKANSEN)在1964年10月1日投入运营时, 其运行速度为210km/h。尽管后来速度不断提高, 但其技术一脉相传, 并未发生质的变化。欧洲高速铁路建设较晚, 所以在其技术文件中对高速铁路规定是: 对于新建线路, 为300km/h; 对于旧线(经现代化改造), 为220km/h, 且列车在平直线上以该速度运行时具有 0.05m/s^2 的后备加速度。美国则认为高速地面运输系统应包括既有线路提速(145~240km/h)、新建高速铁路($\geq 320\text{km/h}$)和磁悬浮系统($\geq 480\text{km/h}$)。在我国, 通常把120km/h以下的铁路称为普通(或常规)铁路, 120~160km/h的称为中速, 160~200km/h的称为快速, 大于200km/h的称为高速。

关于磁浮交通系统的“高速”, 更是没有统一严格的定义, 但一般认为高速磁浮的合理运行速度应该是400~600km/h, 不宜低于300km/h。目前, 德国的TR磁浮列车的运行速度为400~500km/h, 日本的MLX磁浮列车的运行速度为500~600km/h, 美国提出的几种高速磁浮系统概念设计的应用速度均为500km/h。

高速磁浮交通系统主要适用于中长距离的干线或城际交通。中低速磁浮交通系统是指速度在160km/h以下的交通工具, 它主要适用于城市交通, 包括市内交通、市郊交通、中心城市至卫星城镇, 以及区域性城市群交通。

2.2 特征

从系统构成上看, 磁浮交通系统与传统的轮轨式电力牵引交通系统并无太大差别, 都是由线路、车辆、牵引供电和

运行控制四部分组成。不同的是，磁浮列车在正常运行时不与轨道发生机械接触，车辆的悬浮力、导向力和牵引力均由磁力直接产生。不管是哪种形式的磁浮列车，这些力的产生均是车载设备与安装在线路上的相应设备相互作用的结果。安装在线路上的这些设备既要产生传递牵引力、支承力和导向力，又要有较好的电磁特性，所以把这些设备称为功能件，比如直线牵引电动机的定子或转子，产生支承力和导向力的导轨（或线圈）等。列车的非接触运行不仅从根本上消除了机械磨损，减少了维护工作量及其费用，而且还降低了传动噪声。这些优点的获得通常是以增加线路的复杂性为代价的。

从牵引的角度看，磁浮列车的牵引力是由安装在车辆上的定子（或转子）和安装在线路上的转子（或定子）相互作用直接产生，不需要通过“黏着”现象。“非黏着牵引”使得磁浮列车的最大牵引力和最高运行速度不再受“黏着”条件的限制，因此磁浮列车可以实现更高的运行速度，通过更大的坡道。

从列车运动的角度看，磁浮列车的运动方程与轮轨列车具有相同的形式，牵引力、阻力和加速力的基本关系并未发生变化。两者的区别主要有两点：一是磁浮列车中没有轮轨列车中的旋转部件，如旋转式牵引电机、车轮等；二是磁浮列车的阻力构成发生了变化，其传动阻力被电磁阻力所取代。对于高速磁浮列车来讲，空气阻力的构成与轮轨列车也有所不同。

2.2.1 高速磁浮交通系统特征

高速磁浮列车的悬浮既可以利用电磁吸力悬浮原理，也可以利用电动斥力悬浮原理（参见本章 3.3.2 悬浮原理）。

从技术经济和环保等各种因素综合考虑，高速磁浮列车的最高运用速度以 500km/h 左右为宜。为了实现这个速度目标，从根本上解决“轮轨关系”和“弓网关系”对速度的限制，悬浮技术和长定子直线电机驱动技术是目前条件下的最佳选择（参见本章 3.4.3 长定子直线同步电机驱动系统）。

长定子直线电机驱动方式的驱动功率沿线路方向分布布置，它所带来的好处是人们可以根据线路状况和列车运行要求设置此功率，这样既不浪费设备容量，又能保证列车运行需求。

高速磁浮列车的上述功能特点必将给运输和运用带来一些新特点。

2.2.1.1 速度高

由于高速磁浮交通系统从根本上解决了限制列车运行速度的“轮轨关系”和“弓网关系”，列车处于非黏着牵引和非接触运行状态，因此可以方便地实现高速运行，比如 500~600km/h 甚至更高。把高速磁浮列车的最高运行速度设计在 500km/h 左右，是综合考虑速度谱的合理性、技术经济的可行性，以及有利于环境保护等各种因素后做出的选择。

2.2.1.2 加减速速度大

牵引加速度和制动减速度是衡量列车运行性能的重要技术指标。加减速能力大说明列车具有更好的适应能力和较宽的应用场合。德国 TR08 高速磁浮列车在平直线路上的平均加速度和可以应用的平均制动减速度见表 2.7-1。

表 2.7-1 TR08 高速磁浮列车牵引加速度和制动减速度平均标准值

列车速度范围 (km/h)	平均牵引加速度 (m/s ²)	平均制动减速度 (m/s ²)
0~100	0.9	0.6

续表

列车速度范围 (km/h)	平均牵引加速度 (m/s ²)	平均制动减速度 (m/s ²)
0~200	0.9	0.8
0~300	0.8	0.8
0~400	0.7	0.8
0~500	0.5	0.8

2.2.1.3 运输能力大

列车的运输能力取决于每节车辆的承载能力、列车编组和列车发车密度。

磁浮车辆的承载力由悬浮力决定，悬浮力的大小可以根据最大承载需要设计。由于这种悬浮方式为有源支承，因此一般不会像轮轨车辆那样预留太大的裕度，但它足以适应承载力要求。

列车的编组是根据运输需求来确定的。虽然从理论上和技术上讲，由长定子直线电机牵引的磁浮列车非常容易实现大编组，但从方便乘客的角度，编组不宜过大，以 6~10 节为佳。

发车密度是影响运输能力的重要因素。根据磁浮列车的加减速特性、安全制动距离、列车的最高运行速度、牵引供电区间长度、线路条件（如曲线半径、道岔等）等诸多因素的影响，高速磁浮列车的最小发车间隔推荐值为 5min。如果做特殊设计，从理论上讲，可以将其缩短为 2.5min。

若每节车平均定员为 100 人，编组数为 10 节，列车发车间隔 $T=5\text{min}$ ，则单向断面峰值小时运输能力为

$100(\text{人/节}) \times 10(\text{节}) \times 12(\text{列/h}) = 1.2(\text{万人次/h})$

这样的运输能力可以满足市场运输需求。

2.2.1.4 噪声小

交通工具的噪声一般有 3 个来源，即传动噪声、电气噪声和空气动力噪声。

对磁浮列车来讲，在悬浮技术，即悬浮稳定性解决之后，列车不与线路或功能件发生共振，那么传动噪声可以忽略小计。这与轮轨交通系统有着本质的区别。

电气噪声主要是由线路或车载电气设备在开关过程中或由自身电力产生的。现代电力电子技术和控制技术的不断提高，可以使这部分噪声大大减小。可以通过控制技术将这种噪声的频带控制在人的听觉范围之外。

高速磁浮列车的噪声主要来自于空气动力噪声。由于磁浮列车非接触运行，容易实现外壳的封闭，特别是消除了轮轨列车走行部和受电弓产生的噪声，因此磁浮列车的空气阻力和噪声大为减小。根据德国有关部门对 TR08 和 ICE 高速列车测试结果（表 2.7-2）可以看出，在同等速度下，磁浮列车的噪声明显低于轮轨列车。

表 2.7-2 高速磁浮列车与轮轨列车^①噪声比较 dB

列车运行速度 (km/h)	轮轨列车	磁浮列车 ^②
100	72	
160	79	70
200	83	73
250	88	78
280	89	81
300	91	83
400		91

①测试位置为距线路中心 25m 处。

②在德国埃姆斯兰试验线上的测试结果。

2.2.1.5 爬坡能力强

磁浮列车由直线电机牵引，牵引力的形成不需要通过“黏着”现象产生，而是由直线电机电磁力的水平分量直接形成，所以它不受“黏着”条件限制。从理论上讲，如果需要，只需在该段线路的定子绕组上做些特殊设计，增加该段的功率密度即可（参见本章 3.4 磁浮列车驱动系统）。

高速磁浮列车的这种牵引方式，在提高车辆的爬坡能力时，并不需要增加车载设备容量。这与传统轮轨车辆提高爬坡能力的设计思想是完全不同的。

2.2.1.6 非接触受流和三相调压调频区间分段供电方式

为了避免接触受流对列车速度的限制，高速磁浮列车均由长定子直线同步牵引电机牵引。列车所需要的牵引功率由地面牵引变电所直接送至沿线路铺设的电机定子（电枢）绕组。这里既没有所谓的牵引接触网，又没有受电弓（或称受流器），当然也就不存在“弓网关系”。

值得注意的是，从牵引变电所送出的是三相交流电。这种实时调压调频的三相交流电的调节不是由司机操作，而是列车控制系统根据列车当前的位置和状态自动生成的。为了便于控制牵引电机电枢电流，减小线路电压降和降低功率损耗，在牵引变电所之间设置了很多开关站（参见本章 5.3 结构与功能）。

2.2.2 中低速磁浮交通系统特征

2.2.2.1 采用电磁吸力型悬浮方式

中低速磁浮列车的运用速度一般在 160km/h 以下，对于市区运输系统，其最高运用速度一般在 80~100km/h。由于电动斥力型磁浮列车在车辆静止时（ $v=0$ ）不能实现悬浮，只有当列车速度达到一定数值后才能悬浮，如日本的高速磁浮列车起始悬浮速度在 100km/h 左右，美国的 Magplane 的设计起始悬浮速度在 20km/h 左右。所以对于站间距小、起停频繁的城市轨道交通运输，只有在车辆很低速度时才能实现悬浮的磁浮交通系统，才具有实用价值。

2.2.2.2 短定子直线感应电机驱动方式

由于列车运行速度低，所需牵引功率较小，“弓网关系”对列车运行影响轻微，因此中低速磁浮列车采用短定子直线感应电机驱动。电机的定子绕组装在车上，反应板安装在线路上，这样系统成本就比较低，线路设备简单。列车需要的牵引功率由地面牵引变电所将直流电送到敷设在线路上的牵引网，再由车载受流装置以机械接触的方式从牵引接触网上取流，供列车牵引、悬浮、导向及车载用电器使用。

除上述特点外，爬坡能力强，噪声小，加减速快等特点与高速磁浮交通系统相似。

现将几种典型的磁浮交通系统技术结构特点列于表 2.7-3。

表 2.7-3 几种典型的磁浮交通系统的技术结构特征比较

性 能	吸 力 型		斥 力 型	
	HSST	Transrapid	MLX	Magplane
悬浮气隙 (mm)	8~12	8~12	100 左右	100 左右
磁体形式	常导电磁式	常导电磁式	低温超导式	永磁式
悬浮起始车速 (km/h)	0	0	100 左右	20 左右
是否需支撑轮	不需要	不需要	需要	需要

续表

性 能	吸 力 型		斥 力 型	
	HSST	Transrapid	MLX	Magplane
悬浮磁体质量	大	大	较小	较小
悬浮所需功率	较大	较大	小	0
磁力线泄漏	小	小	大	较大
对线路作用力	均匀分布	均匀分布	集中	较集中
运行速度	低速	高速	高速	高速
牵引电机形式	短定子直线感应电机	有铁心长定子直线同步电机	无铁心长定子直线同步电机	无铁心长定子直线同步电机
定子安装位置	车辆两侧	线路两侧	线路两侧壁	线路中央
电机功率因数及效率	低	高	高	高
辅助系统功率	大	大	小	小
是否需要受流器	需要	不需要	不需要	不需要
车辆姿态控制	磁力	磁力	磁力	方向舵 (与飞机相似)
道岔形式	整体移动	整体移动	整体移动	静止离线 (与公路相似)
线路造价	低	高	高	较低

从表 2.7-3 可以看出：

(1) 无论是 EMS 型还是 EDS 型，都能实现车辆的稳定悬浮。为了获得高速度、高效率和大功率因数，高速磁浮列车都采用长定子直线同步电机驱动，因为短定子直线异步电机的功率因数和效率较低，不适于大功率的高速列车。

(2) EMS 悬浮系统对悬浮自动控制技术要求较高，超导斥力悬浮中的超导磁体制造难度很大，因此永磁式斥力悬浮系统有其简单可靠的特点，且当超导磁体技术成熟后便于技术升级。

(3) EMS 悬浮系统的电磁铁相对较重，而且需要较大的励磁电源，所以辅助供电系统功率较大。这不仅增加了车载设备和车辆质量，而且影响了列车的加速能力，增加了列车对线路的作用力。

(4) 磁浮列车线路都有比较复杂的整体移动道岔，这种道岔成本高，转换时间长，维护工作量大。美国的磁浮飞机采用静止离线（与公路分岔的方式基本相同）技术有其独到之处，但它是以增加线路长度为代价的。

(5) 高速磁浮交通系统线路上都铺设长定子直线同步牵引电机的三相定子绕组，它不仅增加了线路造价，而且对线路功能部件的加工和施工工艺提出了更高的要求。

3 磁浮列车

3.1 特点与分类

磁浮列车是磁浮交通系统的关键装备。磁浮车辆的基本特点是没有传统轮轨车辆的车轮，从而实现了磁力支承条件下的非接触运行。正是因为磁浮车辆的悬浮运行，无法利用黏着现象将旋转电机的转矩转换成列车运行所必需的水平牵引力，因此直线电机牵引成为必然选择。

磁浮列车的用途不同，所选用的直线电机的形式和结构也不同。

磁浮列车的上述特点成为其分类的主要依据。

3.1.1 按速度分

按磁浮列车的运行速度可以将其分为高速磁浮列车和中低速磁浮列车（参见本章 2.1 分类）。

3.1.2 按悬浮原理分

按照磁浮车辆的悬浮原理，可以将其分为电磁吸力型（Electro-magnetic Suspension, EMS）和电动斥力型（Electro-dynamic Suspension, EDS）两种。

对于 EMS 型磁浮车辆，车辆与线路功能件之间必须能够产生异性磁极。从经济性和技术合理性上看，一般把可控电流的电磁铁（或称磁体）安装在车上，与车载磁体相对应的线路上安装铁磁导轨，这样车载磁体产生的磁场就会通过铁磁导轨形成闭合磁路并产生异性磁极。由于磁场被约束在良导磁体磁路中，所以磁场的泄漏很少且范围有限，因此对人体和周围环境不会造成影响。也正是因为电磁吸力型有铁磁磁路，限制了磁通密度的提高，所以悬浮气隙较小，一般在 $8\sim 10\text{mm}$ 。这种悬浮系统在车辆静止（列车速度为零）时即可实现车辆悬浮，然后再启动运行，因此它既可适用于低速（如 HSST），也可用于高速（如 TR）。这个可控电流的磁体可以是普通导体制成的电磁铁，也可以是用超导体制成的超导磁体，或是由电磁体与永磁体、电磁体与不控电流的超导磁体复合而成的混合式磁体。

对于 EDS 型磁浮车辆，车辆与线路间必须产生同性磁极。同样，从技术的合理性和经济可行性考虑，一般在车上装有无需控制磁场大小的磁体，如永磁体（Magplane）、电磁体或超导磁体（MLX），在线路的相应位置装上无源感应线圈或连续的感应板。当列车运行后，车载磁体的磁力线就会在感应线圈或感应板中感应电流，形成极性相同的反磁场而形成斥浮。磁体不同，磁场的磁感应强度也不同，那么在相同速度下产生的反磁场也就不同，这就意味着悬浮的高度不同，或者说达到同一悬浮高度所需的列车速度不同。很显然，“速度”是产生电动斥力悬浮的必要条件，因此 EDS 型磁浮车辆在列车静止时不能实现悬浮，只有当列车达到一定速度后才能实现悬浮。这一特点说明 EDS 型磁浮列车比较适用于高速度下运行，而不适用于城市轨道交通等速度较低的应用场合。

从斥力悬浮的原理可以看出，该系统是一个自稳定系统，不需要 EMS 型那样复杂的悬浮控制技术。由于 EDS 型系统线路上没有约束磁场的良导磁体磁路，而且磁场是发散的，因此必须采取屏蔽措施，以防止磁场的影响。没有铁磁磁路带来的好处是磁通密度不受磁饱和限制，悬浮气隙可以很大，通常可在 100mm 左右。

如果按照悬浮磁体所用的材料可以将其分为永磁磁浮列车、常导（普通电磁铁）磁浮列车和超导磁浮列车。

3.1.3 按牵引电机的形式和结构分

按照牵引电机的形式和结构可以分为由短定子直线感应电机牵引和由长定子直线同步电机牵引的磁浮列车。

“短定子”就是将直线电机的定子绕组安装在车上，转子安装在线路上。考虑到结构上的可行性，短定子直线电机一般采用感应式，即异步电机。由于定子绕组安装在车上，那么向定子绕组提供牵引功率的设备（如逆变器）也必须安装在车上。列车所需的包括牵引功率在内的全部电能由车载受流装置以接触受流的方式从牵引供电网上获取。由于存在接触受流，加之感应式直线牵引电机效率比较低的特点，由短定子直线感应电机驱动的磁浮列车一般只适用于中低速磁浮列车。

“长定子”就是将电机的定子绕组敷设在线路上，转子安装在车上。由于车上有悬浮磁场，因此长定子直线电机一般采用同步电机，悬浮磁场同时兼作同步电机的励磁磁场。这种结构既不增加车载设备，也可提高电机的效率和功率因数，可谓一举两得。

3.2 EMS 型磁浮列车悬浮导向系统

3.2.1 悬浮原理与结构特点

电磁吸力悬浮的基本原理可以用如图 2.7-1 所示的钢球悬浮实验系统来说明。

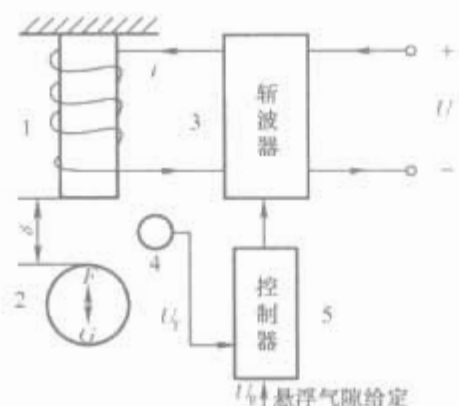


图 2.7-1 电磁吸力悬浮原理图

1—悬浮电磁铁；2—钢球；3—斩波器；
4—气隙传感器；5—控制器

当悬浮电磁铁线圈中有直流电流流过时，就会在电磁铁周围产生磁场，该磁场会对钢球产生吸力。当电磁吸力 F 大于钢球重力 G 时，钢球就会吸向电磁铁，直至吸死，即电磁铁与钢球间的气隙为零；反之，当 $F < G$ 时，钢球就会落地，气隙很大。这两种情况是钢球的两种自然稳态，都没有达到钢球稳定悬浮的目的。为了使钢球稳定悬浮，必须使钢球与电磁铁之间的气隙保持为常数，这可以通过调节电磁铁线圈中的电流以改变 F ，使之与 G 相等来实现。为此，必须实时检测气隙 δ 的大小。当气隙偏离给定值时，及时调节线圈中的电流，就可以通过 F 的变化使气隙回复到给定值，使之保持常数。由于这个过程是动态的、不断调整的，因此就把这种稳定悬浮称为动态稳定悬浮。比如，当气隙 δ 变大，即钢球下落时，说明 $F < G$ ，传感器检测的输出信号 U_i 增加， U_i 大于给定气隙信号 U_g 时，控制器使斩波器的输出电流 i 增大，增加吸力 F ，使 $F > G$ ，阻止钢球下落并使之上升至给定值；反之亦然。这样就可以使钢球稳定悬浮于一定的气隙。

图 2.7-1 所示的悬浮系统是一种比较简单的原理结构。之所以说它简单，是因为球体的重心与电磁吸力作用在一条直线上，且各向对称，因此在控制上只要解决 F 和 G 的平衡问题即可。而对于磁浮列车来讲情况就要复杂得多。磁浮

列车由多节磁浮车辆组成，每节车辆又由多个磁转向架组成，每个转向架上又安装了多个电磁铁。这样在车辆之间、转向架甚至电磁铁间都可以产生相互影响，给悬浮控制增加了很大的难度。不仅如此，线路的坡道、弯道、线路不平顺及外界干扰（如风力）更易造成悬浮的不稳定。另外，还必须解决车辆的多自由度，如点头、蛇形、侧滚等的自动控制问题。因此，图 2.7-1 所示的只是悬浮系统的原理结构并不实用。原因是磁浮车辆位于线路上方，车辆在重力的作用下

自然地落在线路轨道上，如要采用吸力悬浮，必须使车辆的悬浮电磁铁位于线路导轨下方。图 2.7-2 给出了一种目前常用的 EMS 型低速磁浮列车系统的结构。由于车辆包在轨道外侧，所以把这种结构称为外包式结构。

采用交流同步直线电机牵引的电磁吸力型的高速磁浮列车的结构与图 2.7-2 所示的结构基本相同，只是悬浮电磁铁的结构由 U 形（线路断面方向看）改成 E 形（侧向看）而已。

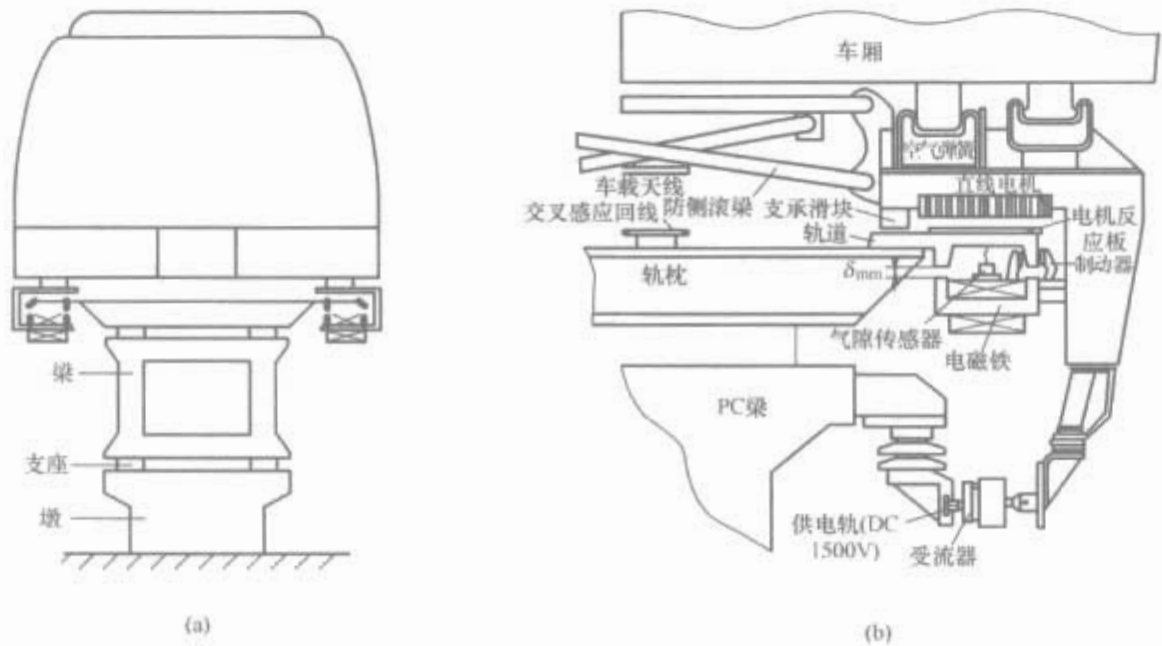


图 2.7-2 EMS 型磁浮列车系统结构
(a) 车线关系 U 形横断面；(b) 局部放大

3.2.2 悬浮力计算

图 2.7-2 所示的单电磁铁可以用如图 2.7-3 所示的模型来等效。如果忽略漏磁通（即 $f_L=0$ ）和磁铁材料的磁阻（即相对磁导率 $\mu_r=\infty$ ），且认为悬浮电磁铁仅在垂直向上运动，则可得线圈电感和磁路磁阻为

$$L(\delta, i) = \frac{\Psi}{i(t)} = \frac{N\phi_T}{i(t)} = \frac{N^2 i(t)}{i(t)R_T} = \frac{\mu_0 N^2 S}{2\delta(t)} \quad (2.7-1)$$

$$R_T = \frac{2\delta(t)}{\mu_0 S} \quad (2.7-2)$$

式中： N 为励磁绕组匝数； S 为电磁铁铁心磁极面积； μ_0 为真空磁导率， $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{H/m}$ ； Ψ 为励磁绕组总磁链。

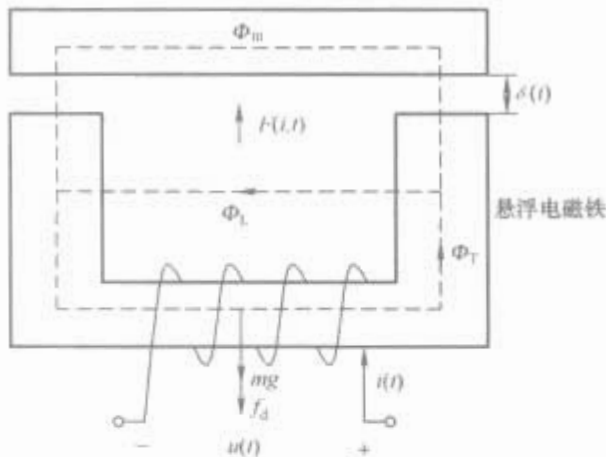


图 2.7-3 单磁铁动态悬浮模型

mg —电磁铁重力； f_d —外部干扰力； $F(i, t)$ —电磁吸力； $\delta(t)$ —磁极表面与导轨表面的距离（悬浮气隙）； $u(t)$ 、 $i(t)$ —励磁线圈外施电压与线圈电流； Φ_T —总磁通； Φ_L —漏磁通； Φ_m —气隙磁通（主磁通）

工作气隙中的磁感应强度为

$$B = \frac{\varphi_m}{A} = \frac{\varphi_T}{A} = \frac{\mu_0 Ni(t)}{2\delta(t)} \quad (2.7-3)$$

电磁铁产生的吸力的近似值为

$$F[i(t), \delta(t)] = \frac{B^2 S}{\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left[\frac{i(t)}{\delta(t)} \right]^2 \quad (2.7-4)$$

由式（2.7-4）可知：悬浮力 F 与气隙 δ 的平方成反比，与励磁电流 i 的平方成正比。式（2.7-4）同时还说明，该系统是不稳定的，因为当某种原因使气隙 δ 增加时，悬浮力减小，从而又进一步使 δ 增加。

电磁铁励磁绕组回路的电压方程为

$$\begin{aligned} u(t) &= Ri(t) + \frac{d}{dt}[N\varphi_T(i, \delta)] \\ &= Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 S}{2\delta(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 S}{2\delta(t)} \frac{d\delta(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2.7-5)$$

电磁铁在垂向上的力学方程（指向地心方向为正）为

$$\begin{aligned} mg + f_d(t) - F(i, \delta) &= ma \\ a &= \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} \end{aligned}$$

式中： a 为电磁铁上下运动的加速度； m 为电磁铁质量。

则

$$m \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} = mg + f_d(t) - F(i, \delta) \quad (2.7-6)$$

于是可以得出悬浮系统的动态模型方程组为

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} &= mg + f_d(t) - F(i, \delta) \\ u(t) &= Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 S}{2\delta(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 S}{2\delta(t)} \frac{d\delta(t)}{dt} \\ F[i(t), \delta(t)] &= \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left[\frac{i(t)}{\delta(t)} \right]^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.7-7)$$

当悬浮电磁铁处于稳定悬浮的平衡点 (i_0, δ_0) 时

$$mg = F_0(i_0, \delta_0) = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left(\frac{i_0}{\delta_0} \right)^2 \quad (2.7-8)$$

从图 2.7-2 可以看出：当车辆停止时，车辆受重力作用，通过转向架上的支撑轮或滑撬落在导轨上；电磁铁通电后，在电磁铁和导轨间产生电磁吸力；当吸力大于重力时，车辆就会被浮起。

为了达到车辆稳定悬浮的目的，必须像钢球悬浮系统一样，实时调节电磁铁线圈中的电流，以使车辆处于动态稳定悬浮状态。由于悬浮电磁铁被安装在与导轨相对应的车辆两侧，每侧纵向有两个带状磁极极面产生悬浮力，因此磁浮车辆是一种分布式荷载，而不像轮轨车辆那样是集中荷载。分布式荷载的优点是，可以减少车辆对线路的冲击作用，且使车辆更容易适应线路的不平顺和导轨接缝的影响，使车载乘客更舒适。

与轮轨式车辆不同的是，磁浮车辆的支承力是由悬浮电磁铁产生的，支承力的大小取决于磁极面积和通过该极面磁通密度的大小。由于这是一种有源支承关系，即支承力是由电能转化而来的，因此磁浮车辆的支承力是有限的。磁浮车辆的最大支承力要根据车辆自重和最大有效荷载来确定，所以磁浮车辆不能长期超载运行。

由图 2.7-2 (b) 也可以看出，常导 EMS 悬浮的磁通是在电磁铁铁心、气隙和导轨之间形成闭合回路的。由于悬浮气隙比较小及磁路不饱和，因此漏磁通并不明显，对外界的影响基本可以忽略。

以上分析虽然是根据低速磁浮列车的结构进行的，但同样适用于电磁吸力型高速磁浮列车，只是后者的悬浮电磁铁要兼作长定子直线同步电机的励磁磁极，电磁铁的结构形式有些变化而已。

3.2.3 导向原理与导向力计算

导向力是向车辆施加的主动力，用以抵消或减少外界干扰力的影响，使车辆保持横向稳定。

导向力可以与悬浮力相互独立，由专用的导向电磁铁产生，德国的 Transrapid 高速磁浮车辆就是采用这种方式，通常把这种方式称为独立导向方式。独立导向电磁铁一般安装在车辆两侧侧面与导轨相对应的位置。导向原理与悬浮原理完全一样，即当车辆受到某种干扰力而偏离线路中心线时，通过控制导向磁铁励磁绕组中的电流来改变导向力，使车辆在侧向上与导轨保持固定不变的距离（侧向气隙），从而实现车辆横向稳定的目的。

独立导向的优点是导向力可以根据需要独立设计，不受悬浮力的制约和影响。当列车速度较高，横向干扰力较大时，通常选择独立导向方式。独立导向的缺点是需要增加车辆设备和成本。

导向力也可以由悬浮电磁铁辅助产生，通常把这种导向方式称为非独立导向或混合式导向。此时，悬浮电磁铁既产生垂向悬浮力，必要时又产生横向导向力。一组电磁铁实现了悬浮与导向两种功能，这与轮轨系统中车轮既起支承又可通过轮缘导向的功能类似。由于悬浮电磁铁以产生悬浮力为主，因此在保证车辆悬浮力的条件下，悬浮电磁铁所能产生的导向力是有限的。正因为如此，非独立导向方式一般被用在低速磁浮列车系统中，如日本的 HSST。

由于独立导向方式的原理和导向力计算与悬浮原理和悬浮力计算方法一样，因此本文只介绍非独立导向方式。

非独立导向方式的原理可用图 2.7-4 来说明。当列车通过曲线或受到某种侧向力干扰时，就会产生横向偏移。为了克服或防止列车的横向摇摆，使列车在横向上保持非接触运行，列车必须有足够大的导向力。如图 2.7-4 所示，非独立导向方式的导向力由悬浮电磁铁的边缘磁通，即气隙磁通的

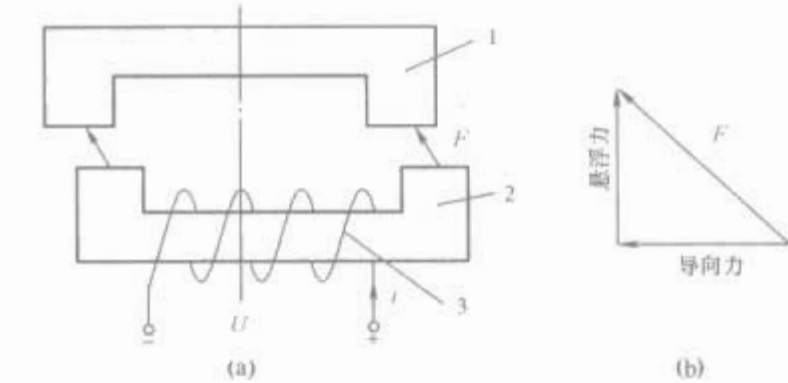


图 2.7-4 混合式导向原理图

(a) 结构图；(b) 导向力示意图

1—导轨；2—悬浮电磁铁铁心；3—励磁线圈

横向分量产生。这个横向分量有使车辆“回中”，即使车辆电磁铁极面与导轨表现上下对齐的趋势。

显然，在一定范围内，车辆的偏移量越大，电磁铁产生的导向力也就越大。而且这种导向力是自动产生的，不需要主动控制。最大导向力的取值主要受线路最大超高和最大侧向风力等因素影响，也就是说，车辆的最大导向力实质上决定了线路的最小曲线半径和超高的设置。

由图 2.7-4 可以看出，如果在安装电磁铁时将电磁铁的磁极表面与导轨表面对齐，那么车辆的初始导向力为零。只有当车辆出现横移时才显现导向力，而且这个导向力会随着车辆的横移量发生变化。这个现象说明，电磁铁的布置方式直接影响着车辆的横向刚度，从而影响车辆的横向舒适度。为此，在实际安装电磁铁时，总是设置一个预偏移量 Δ ，用以产生预导向力。而且为了保证车辆左右两侧的横向刚度，即预导向力一致，总是以两个电磁铁为一组，一个向左预置偏移，另一个向右预置偏移，如图 2.7-5 所示。需要说明的是，电磁铁 A 和 B 实际上是在同一个水平面上沿车辆纵向前后布置的，如图 2.7-6 (a) 所示。

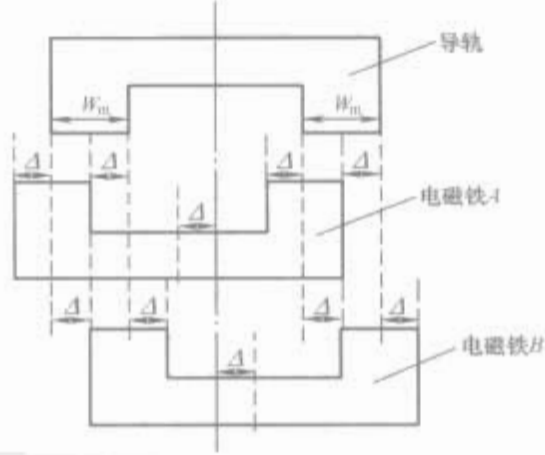


图 2.7-5 带预置导向力的电磁铁（两个一组）原理示意图

通过分析可以得到一组电磁铁产生的总悬浮力 F_z 和净导向力 F_y

$$F_z = F_{zA} + F_{zB} = 2F_0 \left[1 + \frac{\delta}{\pi W_m} + \frac{\Delta - d}{\pi W_m} \arctan\left(\frac{\delta}{\Delta - d}\right) + \frac{\Delta + d}{\pi W_m} \arctan\left(\frac{\delta}{\Delta + d}\right) \right] \tag{2.7-9}$$

$$F_y = F_{yA} + F_{yB} = -(F_{yB} - F_{yA}) = 2F_0 \left(\frac{\delta}{\pi W_m} \right) \left[\arctan\left(\frac{\Delta - d}{\delta}\right) - \arctan\left(\frac{\Delta + d}{\delta}\right) \right] \tag{2.7-10}$$

式中： F_{zA} 、 F_{zB} 分别为电磁铁 A、B 产生的悬浮力； F_{yA} 、 F_{yB} 分别为电磁铁 A、B 产生的导向力， F_0 为一个电磁铁在磁极表面与导轨表面对齐时的总悬浮力，且

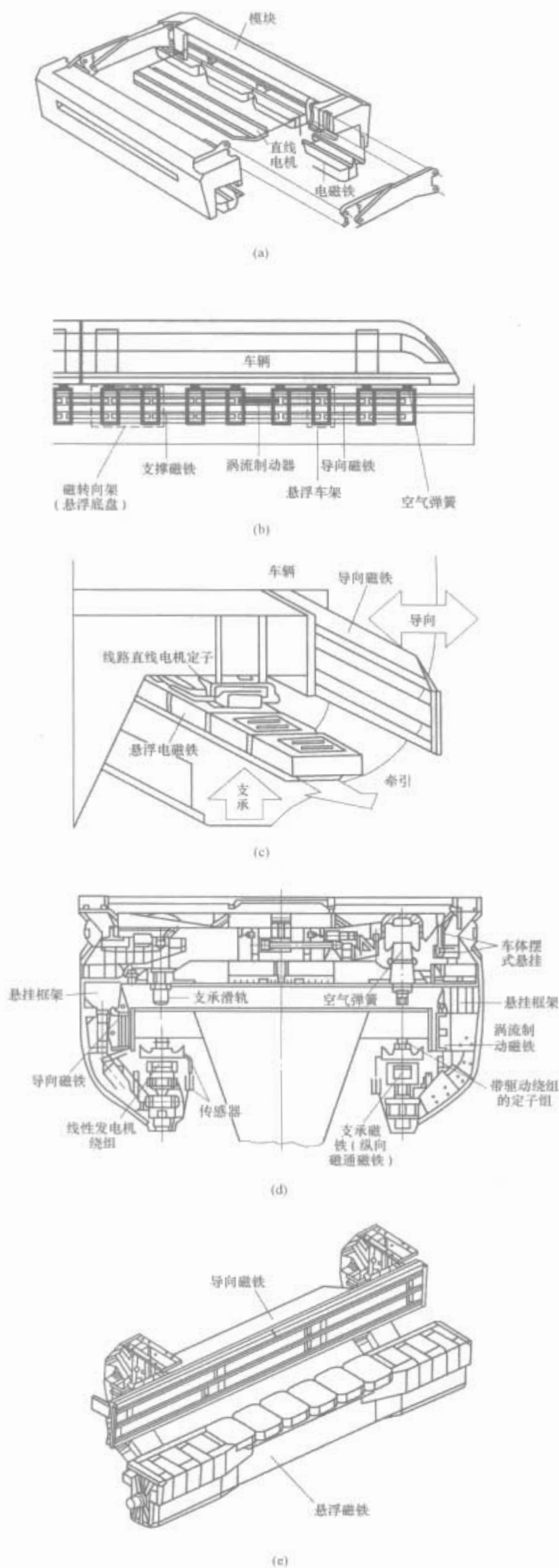


图 2.7-6 EMS 型磁浮车辆悬浮导向电磁铁安装结构
(a) 低速磁浮车辆磁转向架; (b) 高速磁浮车辆 (TR 型) 总体结构; (c) TR 型磁浮车辆悬浮、导向、牵引功能示意图; (d) TR 型磁浮车辆支承/导向系统横断面; (e) TR 型磁浮车辆悬浮导向电磁铁模

$F_0 = B^2 \cdot 2S / 2\mu_0$, 其中 B 为气隙平均磁感应强度, S 为磁极有效面积, μ_0 为真空磁导率, δ 为悬浮气隙长度; W_m 为磁极 (导轨表面) 宽度; Δ 为预置偏移量; d 为车辆实际水平偏移量。

图 2.7-5 仅给出了电磁铁极面与导轨表面等宽的情况, 两者不等宽的情况本文不再论述, 因为实际应用结构一般为前者。图 2.7-6 给出了日本的 HSST 和德国 TR 型磁浮列车悬浮导向电磁铁布置结构图。

3.3 电动斥力型磁浮列车悬浮导向系统

3.3.1 结构特点

斥力悬浮是利用位于线路侧和车辆侧的同性磁极产生的斥力将车辆浮起。这种磁体既可以是电磁体, 也可以是永磁体或超导磁体。比如, 在车辆下部安装上永磁体或超导磁体, 在线路上部连续安装短路导体 (线圈或铝板)。当车辆在牵引力的作用下运动时, 运动的车载磁场就会在线路短路导体中感生电流, 形成与车载磁场极性相同的对抗性磁场 (称为反磁场), 这两个同性磁极的磁场间产生的斥力就是车辆的悬浮力, 人们把这种悬浮方式称为电动斥力悬浮。当该悬浮力足够大时, 就能够将车辆悬浮起来。显然, 悬浮力的大小与车载磁场的磁感应强度、磁场分布面积、短路导体材料与结构, 以及车辆运行速度等因素有关。美国的 Mag-plane 系统采用的是车辆底部布置结构, 而日本的 MLX 系统采用了侧面布置结构。

3.3.2 悬浮原理

众所周知, 直流电磁铁产生直流磁场, 对铁磁性物质会产生电磁吸力。如果在直流磁场内有非磁性的导电物质, 例如铜, 则对电磁铁的原有磁场不会产生任何影响, 也不会产生电磁力。但是, 当电磁铁相对于导电物体 (铜) 有相对运动时, 就会在导电体内产生感应电流, 感应电流将产生自己的磁场。根据著名的楞次定律可知, 感应电流 (见图 2.7-7 中导电板内电流) 所产生的磁力线与原有直流磁场的磁力线在方向上必然相反, 这样在磁力线之间形成电动斥力。所以, 电动斥力形成的条件是有“电”, 而且有“运动”, 没有相对运动就不会有电动斥力, 如图 2.7-7 所示。图 2.7-7 (a) 表示速度为零时没有悬浮力, 但也没有磁阻力; 图 2.7-7 (b) 表示低速时开始产生悬浮力, 而磁阻力大; 图 2.7-7 (c) 表示中速, 悬浮力继续增加磁阻力开始减小; 图 2.7-7 (d) 表示高速时磁阻力很小, 而悬浮斥力很大。对于磁浮列车, 车辆与线路有磁场耦合, 在运动时必然会产生磁阻力。轮轨列车运行时有机械摩擦阻力, 不存在磁阻力, 机械摩擦阻力随速

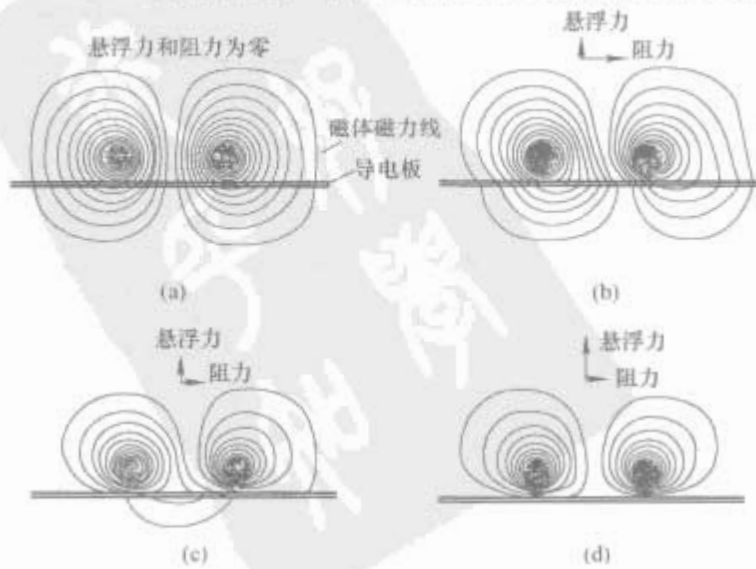


图 2.7-7 电动斥力型磁悬浮原理示意图
(a) 速度为零; (b) 低速; (c) 中速; (d) 高速

度线性增加。而斥力型磁浮列车在低速时磁阻力大，随着速度增加在高速时反而下降，这也可以说是斥力型磁浮列车适用于高速运行的一个原因。在磁浮列车中，悬浮力（或导向力）与运行磁阻力的比值是一个重要指标。从上述可知，这个比值对于斥力型磁浮列车是随着速度的提高而增大。因此，电动斥力型磁浮列车在停车时是不能悬浮的。就像飞机一样，在起跑阶段是用轮子支撑，只有达到一定速度，产生足够的电磁斥力时，才收起轮子，达到悬浮的目的。从这个原理可知，EDS 只能用于高速磁浮列车，而上述的电磁吸力型原理既可用于高速，又可用于低速磁浮列车。

超导磁浮列车原理与上述相同，差别是直流电磁铁被超导磁体所替代。所谓“超导磁体”，就是用超导材料制成的不带铁心的电磁线圈，这种材料在低温（如液氮为-269℃，液氮为-196℃）^①下，导线电阻为零。由于没有电阻，导线允许的电流密度很大，故而可以获得十分强大的直流磁场。同样道理，当这种安装在车辆上的超导磁体相对于线路上的非磁性导体（如铝板或短路线圈）运行时，就会在导体内产生感应电流，其磁力线与超导磁体所产生的磁力线相互排斥，形成电动斥力，将车辆斥浮于空中。由于超导磁体的磁场很强，因此超导磁浮列车的悬浮气隙一般要比常导电磁吸力型的大得多。前者的悬浮气隙一般为100~200mm，后者的悬浮气隙一般为8~12mm。

悬浮力和磁阻力的求解可以利用图 2.7-8 来分析。对于工作在持续电流模式的超导线圈（或电磁铁），相对于一个导电层（铝板），在垂直于它的长度方向运动时产生的悬浮力和磁阻力可分别由式（2.7-11）和式（2.7-12）计算

$$F_s = F_{s0} \left(\frac{v^2}{v^2 + w^2} \right) = F_{s0} \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{v^2}{w^2}} \right] \quad (2.7-11)$$

$$F_R = F_{s0} \left(\frac{vw}{v^2 + w^2} \right) \quad (2.7-12)$$

$$F_{s0} = \mu_0 I^2 / 4\pi z$$
$$w = 2/\mu_0 h\sigma$$

式中： F_s 为电动悬浮力； F_R 为电磁阻力； F_{s0} 为稳定悬浮状态时单个导体上的镜像力^②； μ_0 为真空磁导率； $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ； I 为线圈电流； z 为线圈在导轨上方的稳态悬浮高度； w 为与导电层厚度 h 和导电率 σ 有关的常数； v 为磁浮列车的运行速度。

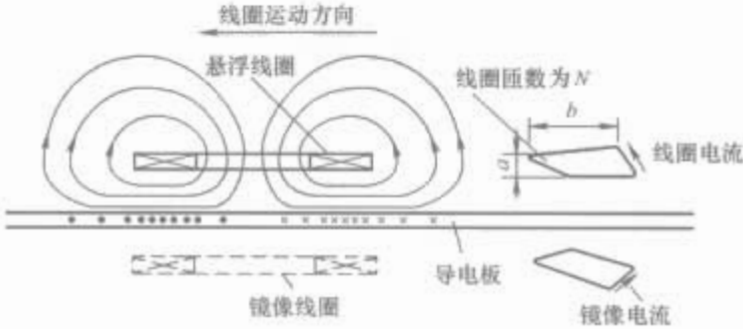


图 2.7-8 EDS 型悬浮原理图

美国 Magplane 车载磁场采用的是永磁体，线路侧导电层是连续敷设的铝板。日本的低温超导高速磁浮列车是在上述基本原理的基础上演化为“零磁通”悬浮导向方式，其中的车载磁体安装在车辆的转向架上，悬浮导向线圈安装在 U 形线路侧壁上，如图 2.7-9 和图 2.7-10 所示。

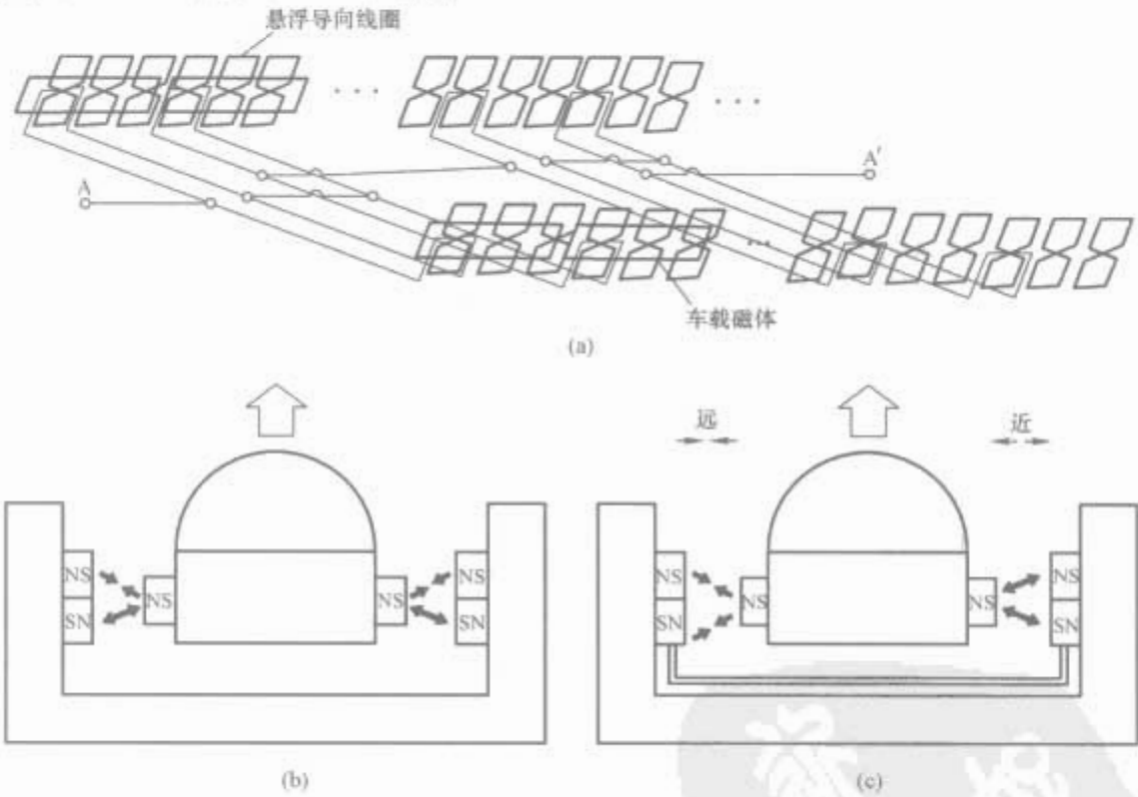


图 2.7-9 “零磁通”悬浮，导向原理示意图

(a) 原理结构布置图；(b) 超导磁浮列车的悬浮机理；(c) 超导磁浮列车的导向机理

当列车静止时，车辆通过支承轮落在线路上，车载磁体中心线位于 U 形线路侧壁 8 字形线圈交叉点平面位置；当列车起动运行时，超导磁体磁场在 8 字形线圈中并不感生电动势，所以磁阻力为 0；当起动列车并达到一定速度（如 100km/h）时，收起支承轮，车辆在重力作用下下沉，超导磁体磁场在 8 字形线圈的上下部分均感生电流。由于 8 字形

线圈为短路线圈且扭转了 180°，因此 8 字形的线圈上、下部分由感生电流产生的磁场极性相反。下部的极性与车载磁场极性相同，产生一个方向向上抬升车体的斥力，上部线圈则产生一个拉升车体的吸力，如图 2.7-9 (b) 所示，这样一推一拉，形成车辆的悬浮力。随着列车速度的提高和悬浮高度的提升，8 字形线圈上、下部分感生电势的差值也越来越

① 由于液氮的温度比液氮的温度高得多，因此通常把“液氮”的温度称为高温，以示区别。
② 镜像力是利用镜像法计算镜像线圈上的悬浮力。根据镜像原理，它与悬浮线圈稳定悬浮时的悬浮力相等。

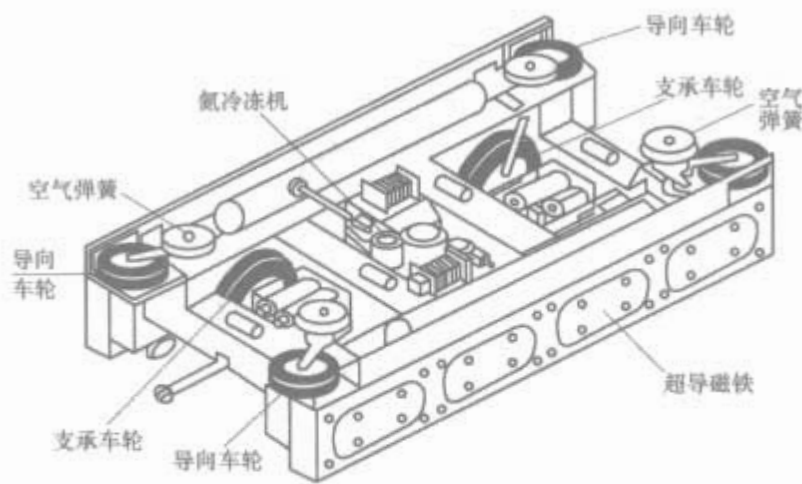


图 2.7-10 日本超导高速磁浮车转向架

小，直至达到车载磁体中心水平线与 8 字形线圈交叉点相一致的平衡点，这个差值才为零。此时，上、下部分感生的磁场相互抵消，故而称为“零磁通”状态。如果由于某种干扰，列车脱离该平衡点，那么必然会产生非零磁通情况，这个磁场总是具有使列车恢复到平衡点的趋势。

从上面的分析还可以看出：列车的悬浮力与列车速度有关，速度越高，悬浮力越大，速度为零，悬浮力也为零，因此这是一个自稳定系统。

3.3.3 导向原理

EDS 型磁浮列车的导向原理与悬浮原理一样。日本低温超导高速磁浮列车的导向同样是利用“零磁通”原理，如图 2.7-9 所示。该系统的导向与悬浮共用一个线圈，即 U 形线路两侧壁上的 8 字形线圈；而且把两侧 8 字形线圈从 U 形槽底部用两根扭转 180°的导线连通，如图 2.7-9 (a) 所示。当列车在线路中心运行时，车载磁体在两侧壁产生的感生电势相同，使列车处于平衡状态，8 字形线圈则处于“零磁通”状态。当列车偏离线路中线运行时，必然使车辆距 U 形槽一侧较近，而另一侧较远，车载磁体在较近一侧线圈中产生的感生电势较强，从而产生同性磁极，即斥力，在较远一侧则产生吸力。这样一吸一斥，使列车有“回中”的趋势，即使车辆回到线路中心的平衡位置，达到导向的目的。

从以上分析可以看出：导向与悬浮的机理完全相同，只不过是 8 字形线圈在空间位置上由上、下的悬浮变成了左、右的导向，但“零磁通”的概念不变。

3.4 磁浮列车驱动系统

传统机车车辆是依靠车轮踏面与轨面之间的机械接触支承车辆重力，由轮缘和轨肩的相互作用产生导向力，牵引力则是通过轮轨黏着现象产生，如图 2.7-11 所示。磁浮列车是利用磁力来克服车辆重力并产生运动时的横向导向力，运行时车辆与轨道没有机械接触，称为非接触运行。此时，牵引列车的牵引力无需通过黏着现象产生，而是由直线电机的磁力直接产生。这种不依靠黏着现象的牵引方式称为非黏着牵引。

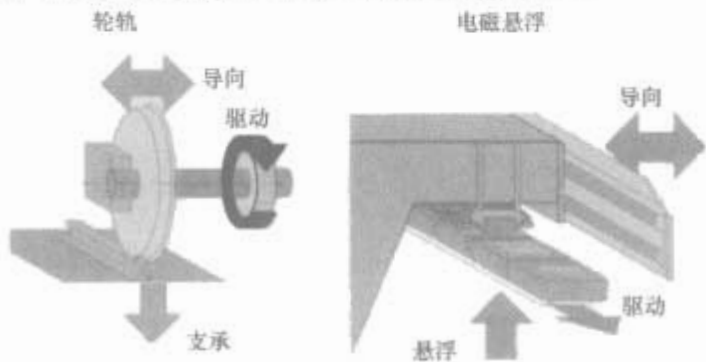


图 2.7-11 轮轨列车与磁浮列车支承、导向和牵引力比较

按照直线电机的原理和安装方式，可以将其分为短定子异步直线电机 SSLIM (short stator linear induction motor) 和长定子同步直线电机 LSLSM (long stator linear synchronous motor) 两种。前者的定子安装在车上，转子（又称反应板）敷设在线路上，这种结构适用于中低速磁浮列车；后者的励磁绕组安装在车上，电枢绕组敷设在线路上，这种结构适于高速磁浮列车。

对于短定子型磁浮列车，由于电机的定子绕组和为其供电的大功率动力电源设备安装在车上，所以增加了车辆的质量，而又必须通过受流器从线路供电接触网上接触获得电能。所以，无论是从牵引方式还是从受流方式看，这种形式的磁浮列车一般只适用于中低速运行。

对于长定子型磁浮列车，由于电机的定子绕组（电枢绕组）布置在地面线路上，给电机供电的动力电源安装在地面变电所内，所以车内无需大功率动力装置，仅需功率较小的辅助电源（如照明、空调、励磁、控制等）。这部分辅助电能可以通过非接触式方式从地面电枢绕组获得，对于 TR 系统，是经直线发电机转换而来的。所以长定子型磁浮列车不需要受流器，可以实现完全无机械接触运行，列车的速度既不受轮轨黏着限制，也不受接触受流限制，可以达到传统轮轨机车车辆无法达到的高速度，例如 500km/h 左右。TR、MLX 和 Magplane 都是采用的这种驱动方式。如果能够克服空气阻力，则还可以达到更高的应用速度。当列车低速运行或长时间停靠站，直线发电机无法为列车辅助系统提供足够的电能时，还要通过安装供电接触网和受流器来获得电能。上海机场线两端车站附近线路就是采取这种方式。

利用电机可逆性原理，与旋转式电机一样，异步或同步交流直线电机可以进行再生制动、电阻制动或反接制动。

3.4.1 磁浮列车阻力

磁浮列车运行阻力主要由电磁阻力、空气阻力和附加阻力三部分组成。空气阻力和附加阻力的形成机理和分析方法与轮轨式列车相同。电磁阻力是由悬浮、导向和直线电机牵引与发电系统中的电磁效应产生的阻力，该阻力与列车的运行速度有关。

电动斥力型磁浮列车悬浮导向系统产生的电磁阻力可由式 (2.7-12) 计算，本文将以电磁吸力型低速磁浮列车为例介绍悬浮导向电磁铁产生的电磁阻力。

EMS 型低速磁浮列车悬浮电磁铁与导轨的关系如图 2.7-12 所示。如果励磁电流为常数，并忽略漏磁通和边缘磁通，则气隙磁密写成分离变量形式

$$b(x,z) = X(x)Z(z)$$

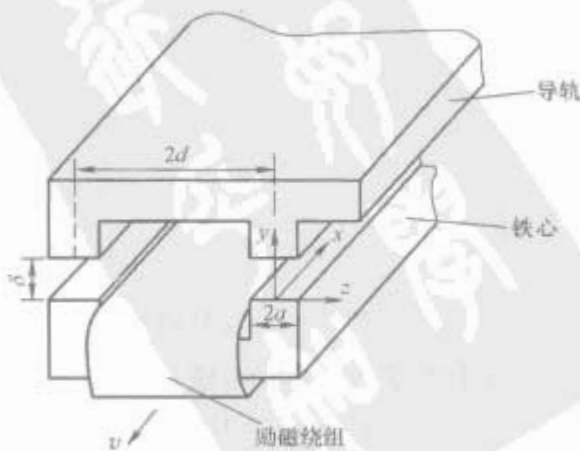


图 2.7-12 电磁铁与导轨关系示意图

由本征值理论得

$$Z(z) = \cos \lambda_n z \quad (\lambda_n \text{ 为本征值})$$

于是得到气隙磁感应强度解的形式为:

当 $0 < x < L$ 时

$$b(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} [c_n B_0 + X_n(x)] \cos \lambda_n z$$

$$= B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) \cos \lambda_n z \quad (2.7-13)$$

当 $x < 0, x > L$ 时

$$b(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) \cos \lambda_n z \quad (2.7-14)$$

式 (2.7-13) 是气隙中的磁场分布表达式, 说明了磁场在磁极表面与导轨之间气隙中的分布情况; 而式 (2.7-14) 则反映了电磁铁磁极端部之外的磁场分布情况。式中, B_0 为电磁铁静止不动时的气隙磁感应强度; L 为电磁铁磁极长度。 $X_n(x)$ 的取值如下

$$\begin{cases} x < 0, X_n(x) = C_n B_0 \frac{\beta_n}{\alpha_n - \beta_n} [e^{-\beta_n x} - e^{-\beta_n (x-L)}] \\ 0 < x < L, X_n(x) = C_n B_0 \frac{1}{\alpha_n - \beta_n} [\beta_n e^{-\alpha_n x} - \alpha_n e^{-\beta_n (x-L)}] \\ x > L, X_n(x) = C_n B_0 \frac{\beta_n}{\alpha_n - \beta_n} [e^{-\alpha_n x} - e^{-\alpha_n (x-L)}] \end{cases}$$

$$\alpha_n = \frac{1}{2} (-k + \sqrt{k^2 + 4\lambda_n^2})$$

$$\beta_n = \frac{1}{2} (-k - \sqrt{k^2 + 4\lambda_n^2})$$

$$c_n = \frac{4}{\pi(2n-1)} \sin \frac{2n-1}{2} \pi$$

$$k = \frac{\mu_0 \sigma v}{\delta}$$

式中: σ 为导轨导电系数; δ 为气隙长度; n 为自然数; v 为列车运动速度; μ_0 为真空磁导率; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

由此可以求出电磁铁的电磁阻力为

$$F_b = F_{x0} \frac{\delta}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \{ C_n^2 [\alpha_n (e^{\beta_n L} - 1) + \beta_n (e^{-\alpha_n L} - 1)] \}$$

$$F_{x0} = 2aLB_0^2 / \mu_0 \quad (2.7-15)$$

式中: F_b 为电磁阻力; F_{x0} 为电磁铁稳态电磁吸力; $2a$ 为磁极宽度。

由式 (2.7-15) 可以看出, 电磁阻力受因子 δ/L 的影响较大。当悬浮气隙 δ 一定时, 电磁铁越长, 阻力则越小。

根据式 (2.7-15) 可以计算出电磁阻力的速度特性曲线, 如图 2.7-13 所示。由此可以看出, 低速时, 电磁阻力随速度的增加而增加; 但当列车达到一定速度后, 电磁阻力反而随速度的增加而减小, 这个速度与列车的结构有关。

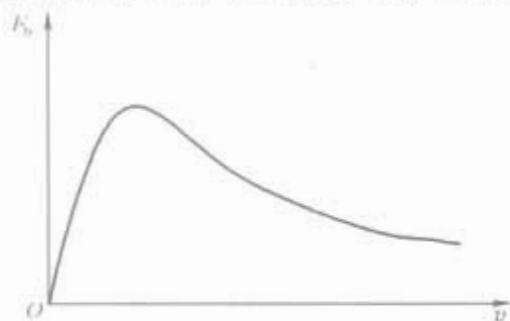


图 2.7-13 电磁阻力的速度特性曲线示意图

3.4.2 短定子直线感应电机驱动系统

短定子直线感应电机的基本工作原理如图 2.7-14 所示。

当三相绕组中通入三相对称正弦电流后, 会产生气隙磁场。当忽略其端部效应时, 该气隙磁场分布状况与旋转电机的相似, 即沿展开的直线方向呈正弦分布。当三相电流随时间变化时, 气隙磁场将按 A、B、C 相序沿直线方向移动。

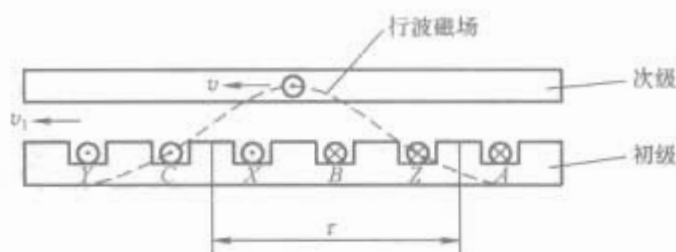


图 2.7-14 直线电机的基本工作原理示意图

这个原理与旋转电机相似, 只不过该磁场是平移的, 而不是旋转的, 因此把这个磁场称为行波磁场。显然, 行波磁场的移动速度与旋转磁场在定子内圆表面上的线速度是相同的, 称为同步速度 v_1 , 而且

$$v_1 = 2\tau f_1 \quad (2.7-16)$$

式中: f_1 为定子电压的频率; τ 为电机的极距。

行波磁场切割二次短路导体 (既可以是栅形结构, 又可以是连续短路导体, 即反应板), 将在二次短路导体中感生电流。该短路电流与气隙磁场相互作用产生电磁推力。若假定初级固定不动, 次级在此推力作用下以速度 v 作直线运动, 而且

$$v = v_1 (1 - s) = 2\tau f_1 (1 - s) \quad (2.7-17)$$

式中: s 为转差率。

由式 (2.7-16) 可以看出, 直线电机的同步速度仅与电机的极距 τ 和电源频率 f_1 有关, 且成正比。当电机制造好之后, τ 为常数, 所以电机同步速度仅与定子电源频率有关。

用于中低速磁浮列车的扁平型单边直线感应电机的结构如图 2.7-15 所示。

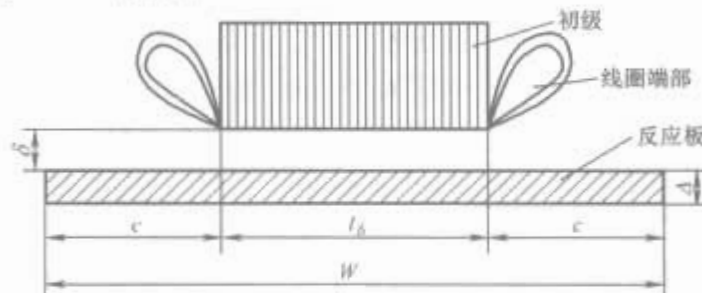


图 2.7-15 扁平型单边直线感应电机断面结构示意图

其稳态特性的计算方法基本上可以沿用旋转式感应电机的等效电路。但由于用于磁浮列车中的直线感应电机工作气隙 δ 较大, 通常为旋转电机的 5~6 倍, 因此励磁电流较大, 而且由于结构开放, 造成较大的端部效应。但当电机的极数较多时, 由端部效应造成的三相电流不对称可以忽略不计。端部效应引起的损耗可以作为电路因素引入等效电路中。图 2.7-16 就是引入边端效应损耗的 T 型等效电路。图 2.7-17 所示为沿直线电机长度方向各区域气隙中的磁通密度分布情况。

根据电机学原理, 可以得到电机的推力。直线感应电机的推力 F 由电机中心区域推力 F_c 和边端区域推力 F_e 组成, 即

$$F = F_c + F_e \quad (2.7-18)$$

$$F_c = \frac{sE_1^2}{r_2 v_1}$$

$$F_e = \frac{(E_1/R_e)^2 R_f}{v_1 (1-s)} = \left\{ \frac{E_1}{r_k [1/(s^2 + \beta^2)]} \right\}^2 \times \frac{s(1-s)}{(s^2 + \beta^2)^2} \frac{1}{v_1 (1-s)} = \frac{sE_1^2}{r_k v_1}$$

总推力 F 用初级端电压 \dot{U}_1 可以表示成

$$F = \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_k} \right) \frac{s\dot{U}_1^2}{\left[1 - \left(\frac{s}{r_2} + \frac{s^2 + \beta^2}{r_k} - j\beta_0 \right) Z_1 \right]^2 v_1} \quad (2.7-19)$$

式中： $b=3/\epsilon^2\pi^2$ 为计算系数； ϵ 为端部效应系数，且 $\epsilon=0.2\sim 0.4$ ； $r_k=(18/\lambda)(p+\epsilon)^2l_d^2N_{1p}^2$ 为计算系数，其中 $\lambda=e\tau l_d/k_t r_t$ ， k_t 为横向边缘效应系数， l_d 为次级导体密度， N_{1p} 为每相初级绕组匝数， p 为极对数； Z_1 为初级绕组阻抗，且 $Z_1=r_1+jx_m$ ， b_0 为励磁电纳，且 $b_0=1/x_m$ 。

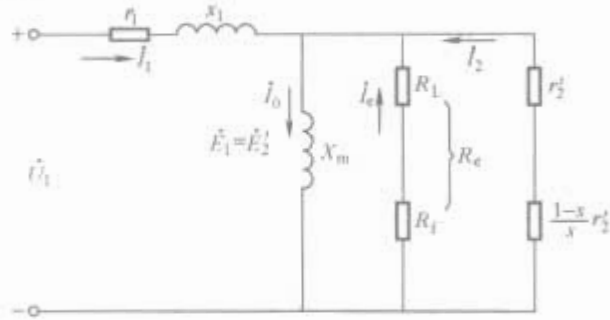


图 2.7-16 记入边端效应的直线感应电机的等效电路

r_1 —初级绕组电阻； x_1 —初级绕组漏抗； X_m —对应于主磁通的励磁电抗； r_2' —次级导体电阻初级换算值； R_L —边端效应有效部分功率等效电阻初级换算值； R_I —边端效应无效部分功率等效电阻初级换算值； R_e —边端效应消耗功率等效电阻初级换算值

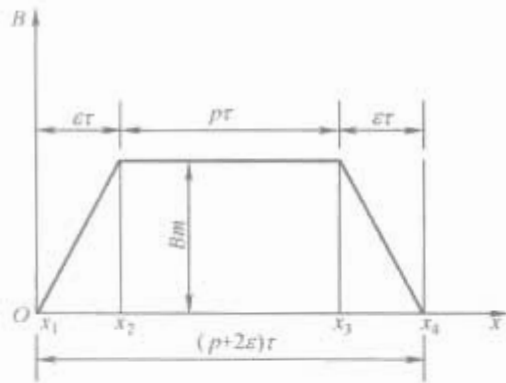


图 2.7-17 直线感应电机长度方向各区域中气隙磁通密度分布

τ —极距； p —极对数； ϵ —端部效应系数， $\epsilon=0.2\sim 0.4$

根据上述公式可以得到直线感应电机的推力—速度特性曲线，如图 2.7-18 中曲线 1 所示。为方便与旋转感应电机的特性进行比较，图中还给出了旋转感应电机的转矩—速度特性曲线，图 2.7-18 中曲线 2。

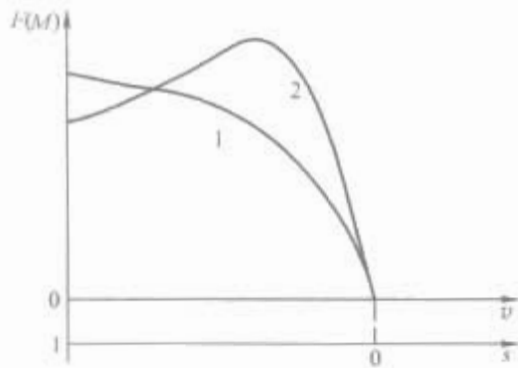


图 2.7-18 直线感应电机与旋转感应电机推力—速度特性比较

由以上分析可以看出：直线感应牵引电机工作气隙大，从而导致较大的励磁电流和损耗，降低了电机的效率和功率因数。边端效应不仅使电机的效率降低，而且还导致三相定子电流不对称，它在减小功率因数的同时还会引发谐波转矩，造成运行过程中的振动现象。

另外，对于旋转电机来讲，虽然在产生切向转矩的同时还会产生法向力，但由于电机结构各向对称，总的法向力为零，因此该法向力对外并不能显现出来。单边型直线电机则不同，由于它是一种扁平式结构，总的法向力并不为零，而且磁浮列车的直线感应电机的次级为铁铝复合结构的反应

板，因此电机的法向力既可能表现为正的法向力（电机定、转子间为斥力），又可能表现为负的法向力（电机定、转子间为吸力）。显然，这种变化的法向力对悬浮系统来讲是非常有害的。因为在设计悬浮系统时，除了要克服车辆重力及在运动中所产生的动力作用外，还必须考虑这种由电机产生的法向干扰力。分析证明，电机的法向力是很大的，与电机的牵引力具有相同的数量级。为了避免或减小法向力对悬浮系统的干扰，在设计电机的控制系统时，应尽量让电机工作在法向力为零的工作点附近，或让法向力保持为某个常数。

3.4.3 长定子直线同步电机驱动系统

直线同步电机技术是在 20 世纪 60 年代随着对高速磁浮列车的研究而得到快速发展的。它的工作原理与旋转式同步电机完全一样，只不过在结构上有较大差异而已。直线同步电机的励磁磁极既可以是电磁体（德国的 TR 型磁浮系统），也可以是超导磁体（日本的 MLX 系统）或永磁体（美国的 Magplane 系统）。在长定子直线同步电机驱动系统中，通常把电机的励磁磁场同时兼作悬浮磁场。

同步直线电机的原理结构如图 2.7-19 所示。电机的定子（即电枢）安装在线路上，转子（励磁）安装在车辆的磁转向架上，如图 2.7-20 所示。

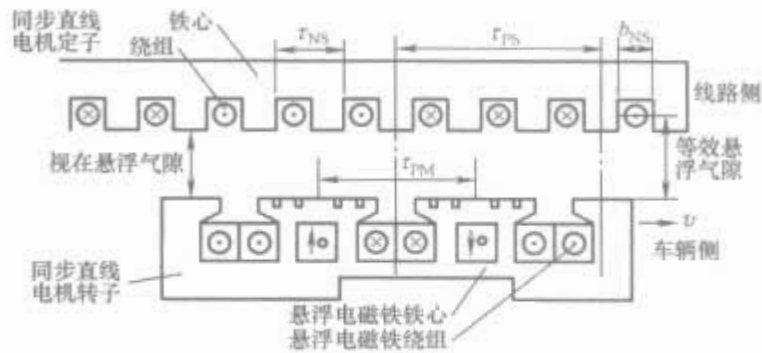


图 2.7-19 直线同步电机原理结构图

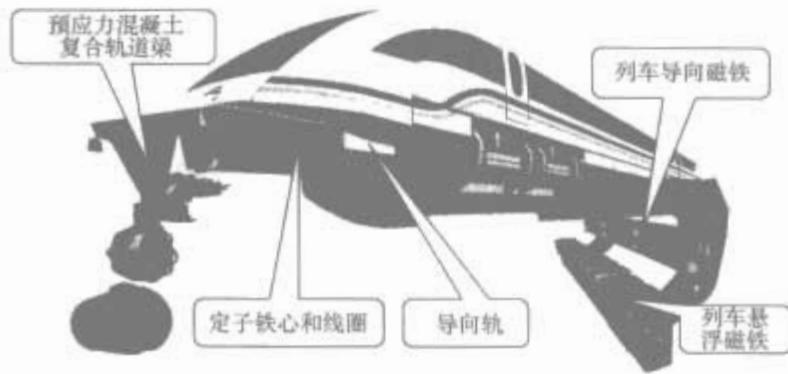


图 2.7-20 同步直线电机在磁浮交通系统中的安装关系

由于同步直线电机的励磁磁场兼作悬浮磁场，因此磁场的大小，即气隙磁感应强度由悬浮质量决定，在分析时认为励磁磁场为常数。励磁所需的能量由车载直线发电机提供，发电绕组安装在悬浮电磁铁铁心表面。在列车的起动阶段，悬浮电磁铁由车载蓄电池的储能提供能量，当列车达到一定速度后，发电机产生的电能就可以满足列车的需要。

直线同步电机的电枢电流由地面供电设备提供，也就是说牵引列车运行的牵引功率及大功率变流设备不需要配置在车辆上，而是安装在变电所里。三相调压调频的交流电由变电所里的设备通过馈电电缆和分区开关直接供给同步牵引电机的三相定子绕组，如图 2.7-21 所示。

如果供电电压的频率为 f ，电枢绕组的极距为 τ_{pm} （见图 2.7-19），那么，磁浮车辆的速度为

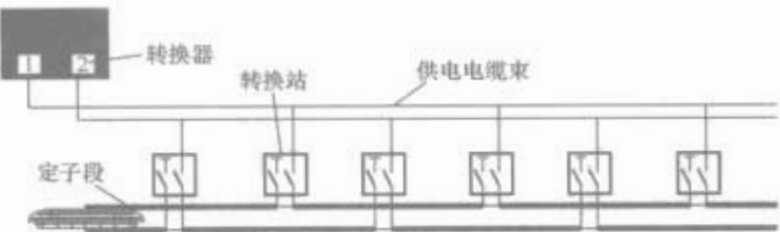


图 2.7-21 高速磁浮列车牵引供电系统原理图

$$v = 2\tau_{ps}f \tag{2.7-20}$$

当车辆的质量一定时，通过调节悬浮电磁铁的励磁电流可以使电机气隙中的磁感应强度保持恒定。根据毕奥—萨伐尔（Biot-Savart）定律，此时电机推力的大小仅受电枢电流及其与励磁磁极相位的影响。而电枢电流则是由供电电压及供电范围内线路阻抗决定的，所以调节推力的有效途径就是改变供电电压或线路阻抗。线路阻抗与导体材料及其分区长度和列车运行速度（ v ）有关，供电电压则要根据列车即时速度（ v ）和列车牵引特性要求提供。显然，当电枢电流一定时，推力的大小与列车长度，即励磁磁极数成正比，列车越长，推力就越大。当然，列车编组越长，阻抗就越大，要保持电枢电流不变，必须要增加电枢电压。

根据电机理论，若忽略供电电压的高次谐波，则直线同步电机的基波推力为

$$F_1 = \frac{3U_1 I_1 \cos\psi}{v} \tag{2.7-21}$$

式中： F_1 为一侧直线同步电机基波推力； U_1 为电枢电压基波有效值； I_1 为电枢电流基波有效值； ψ 为功率因数角； v 为列车速度。

通过控制技术，功率因数角 ψ 可以很小，所以同步直线电机的 $\cos\psi \approx 1$ 。

电枢电流 I_1 可以采用同步电机定子回路等效电路方法，根据线路单位长度上的阻抗及电枢反应电压求出。

3.5 磁浮列车制动系统

与其他交通工具一样，磁浮列车也具有完善的制动系统，主要有电气制动、涡流制动和摩擦机械制动等方式。

3.5.1 电气制动

电气制动实际上是利用电机的可逆性原理，使牵引直线电机在列车动能驱动下从牵引时的电动机工况转换为发电机工况，从而产生制动力。它是磁浮列车最主要、最常用的制动方式。电气制动时，作为发电机运行的牵引电机产生的电能可以送回电网，也可以消耗在制动电阻上，前者称为再生制动，后者称为电阻制动。

电气制动已经是一种比较成熟的技术，在各类轨道交通系统中广泛应用。

3.5.2 机械制动

机械制动实际上就是摩擦制动。日本的 HSST 采用液压制动器挤压线路导轨的方法，如图 2.7-2 所示。日本的 MLX 采用盘形制动及轨面摩擦制动方式，制动盘采用碳或碳基混合材料制成。动轮盘和静轮盘均安装在支承车轮内部，如图 2.7-22 所示。盘形制动和车轮摩擦制动作为一种辅助制动方式，只有在车辆速度低于悬浮速度，即车辆“着陆”时才发挥作用。当用于紧急制动时，即当车辆高速运行出现紧急情况时可以紧急“着陆”，实施盘形和摩擦制动。但在这种情况下，制动器盘只能使用一次。德国的 TR 型高速磁浮列车的机械制动有两种方式，一种为滑撬制动，另一种为涡流制动（参见 3.5.3 涡流制动）。滑撬制动就是当列车速度较低时，车辆着陆，车辆依靠底部的滑撬与轨道顶面

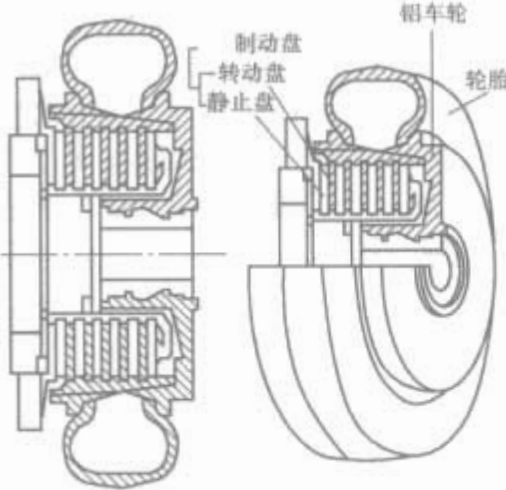


图 2.7-22 盘型制动器

摩擦形成滑动运行，同时产生制动力。

3.5.3 涡流制动

涡流制动亦称安全制动。之所以把它称为安全制动，是因为在正常情况下并不启用该功能，只有在电气制动失效或出现紧急情况时才起动涡流制动。

TR08 磁浮车辆上每节车安装有两个涡流制动电磁铁，如图 2.7-23 所示。

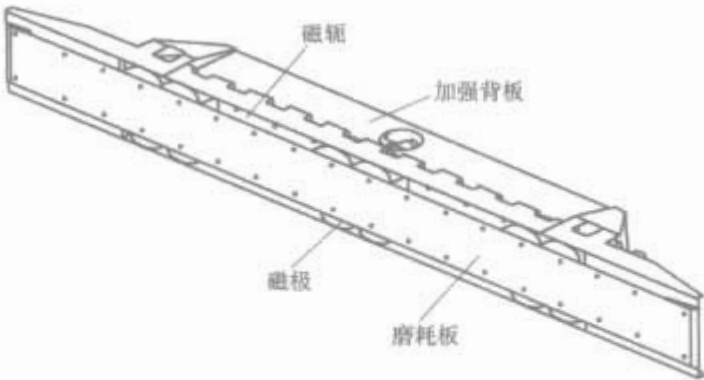


图 2.7-23 涡流制动电磁铁

制动电磁铁分布在车辆两侧中部与线路导轨侧面相对应的位置，如图 2.7-6（b）所示。每个涡流电磁铁由 12 个磁极组成，沿车体侧面纵向分布。这 12 个磁极分成 4 组，每组由一套独立的制动系统控制。

涡流制动为非接触制动，但当列车速度低于约 150km/h 时，制动电磁铁的磁场在导轨中产生的反磁场（涡流）减小到不能克服电磁铁对导轨的吸力时，涡流制动电磁铁将相对悬浮架产生侧向位移，其与导轨侧面发生机械接触，产生“磁轨”制动作用。当速度接近 10km/h 时，涡流制动器将被关闭，转为滑撬制动器（参见 3.5.2 机械制动）。

3.6 高低速 EMS 型磁浮列车悬浮、导向、驱动特点比较

以德国 TR 型为代表的高速磁浮列车和以日本 HSST 为代表的中低速磁浮列车都采用的是电磁吸力悬浮原理。前者采用独立导向和长定子同步直线电机驱动，后者则采用混合式导向和短定子异步直线电机驱动。两种系统既有许多相同或相似的地方，也有一些不同，下面作比较分析。

3.6.1 悬浮

虽然 TR 型和 HSST 磁浮车辆均采用电磁吸力悬浮原理，但 HSST 采用的是 U 形电磁铁，如图 2.7-2（a）所示；TR 型采用的则是 E 形（侧视）电磁铁，如图 2.7-2（b）所示。

U 形电磁铁沿车辆两侧纵向布置，对一节车辆，特别是对一个转向架的 4 个电磁铁（一侧）来讲，电磁铁的磁极前后对接，而且沿线路纵向的磁极极性不变，基本上可以看

成是连续布置的,因此悬浮磁场是连续的。这种结构说明,从悬浮磁路上看,悬浮转向架一侧的4个电磁铁可以等效成一个电磁铁,因此其端部效应较小。由于端部效应会在线路导轨中产生涡流,因此由涡流产生的磁阻力较小。既然涡流小,线路导轨就可以用整块良导磁性铁质材料加工而成,而不必用成本较高的电工钢片叠制而成。显然这样的线路结构既简单又廉价,而且便于加工、安装和维护。E形电磁铁则不然,它沿线路方向磁极极性交替布置,因此当列车运动时,在线路导轨中的涡流很大,为此导轨应由电工钢片叠制而成。TR型磁浮系统中的线性同步电机的长定子铁心正好作为悬浮导轨,为悬浮系统提供了方便。如图2.7-19所示,对于E形电磁铁悬浮系统,由于线路定子铁心齿槽原因,车辆的视在悬浮气隙(悬浮电磁铁铁心表面距直线电机定子铁心表面的距离)就比其等效悬浮气隙小。而U形电磁铁系统就不存在这种情况,其视在气隙就是等效悬浮气隙。这种E形结构等效悬浮气隙的增加,说明在同样的悬浮励磁电流和磁极面积的情况下,所能产生的悬浮力就小,若要达到与U形电磁铁同样的悬浮力和视在悬浮气隙,就要增加励磁电流。

3.6.2 导向

导向力就是为车辆提供的侧向力,用以抵消列车未被线路超高平衡的离心力或用以平衡列车在弯道上停车或低速运行时的列车重力的横向分力以及其他干扰力(如风力)。众所周知,列车的离心力与列车运行速度的平方成正比,与曲线半径成反比。在进行线路设计时,为了克服离心力的影响,必须在曲线上设置与列车运行速度和曲线半径相对应的超高。当列车以此设计速度在该曲线上运行时,列车的离心力正好被列车重力的横向分力所平衡,否则将会出现未被平衡的离心力。

对于高速磁浮列车来讲,由于列车速度高,所设置超高就高,在出现特殊情况(如曲线上限速运行或停车)时,就要求车辆有足够大的导向力,使车辆保持与线路的非接触状态。因此列车的速度越高,所要求的导向力就越大,这就是为什么HSST采用混合式导向,而TR型采用独立导向的原因。

HSST磁浮车辆的导向力由U形悬浮电磁铁的边缘磁通产生(参见3.2.3导向原理与导向力计算),如图2.7-4所示。在保证悬浮力的情况下,所能产生的最大导向力大约只有悬浮力的20%。这种导向力只能满足低速磁浮列车的导向力要求,而无法达到高速磁浮列车的要求。独立导向则不然,它可以根据导向力需要设计独立的导向电磁铁,如图2.7-6(b)、图2.7-67(c)所示。

以上分析说明,非独立导向实际上限制了磁浮列车的最高运行速度。日本一直未能按其设想将HSST磁浮列车的速度提高到200km/h,甚至300km/h,导向问题是其中的重要因素之一。

3.6.3 驱动

磁浮列车由直线电机驱动。很显然,长定子方式要比短定子方式的经济成本高,而且维护工作量大。

低速磁浮列车之所以采用短定子直线感应电机驱动,是因为除考虑经济因素外,低速系统所需的驱动功率较小,加之速度低,可以采用接触受流的方式由车载受流器从牵引接触网上取流。由此得到的能量不仅可以供驱动需要,而且还可以为车载辅助用电设备使用,可谓一举两得。但是由于短定子直线感应电机的次级电流来自于初级绕组,加之工作气隙很大,因此需要很大的励磁电流,从而产生较大的功率损

耗,使电机的效率和功率因数很低。电机的效率和功率因数的乘积称为电机的品质因数,所以直线感应电机的品质因数很低,约为0.4。从这个角度讲,品质因数如此低的直线感应电机也影响了磁浮列车速度的提高。

接触受流是影响列车速度的关键因素之一,所以高速磁浮列车毫无例外地采用长定子直线同步电机驱动。采用“长定子”是为了取消接触受流,使列车所需的驱动功率直接由地面牵引变电所通过输电电缆送至电机定子绕组;采用同步电机则是为了提高电机的效率和功率因数,因为同步电机为独立励磁,尤其适用于大气隙工作,而电机的功率因数又可通过调节功率因数角来改善。同步电机的励磁磁极必然为E形电磁铁,而电机的定子铁心又为同是悬浮电磁铁的励磁电磁铁提供了它所需要的良导磁体磁路。由此可以看出,长定子同步牵引电机的定、转子是集悬浮与牵引于一身的,它们互为利用,既提高了设备的利用率,又改善了技术性能,是一种较好的设计思路。

4 磁浮交通运行控制系统

磁浮列车运行控制系统是一个集计算机、自动控制、通信及信息处理等先进技术于一体的综合集成系统。在磁浮交通系统中,运行控制系统与车辆、牵引供电与线路等系统整合为一体,完成对列车运行的安全防护、自动运行控制及调度管理等任务。其基本任务是控制列车的运行,确保列车运行的安全,提高运输组织的效率,实现列车运行的自动化。所以,磁浮铁路的运行控制系统不仅仅是实现列车运行的安全控制和防护,它还兼有列车运行的管理和调度等功能。

要保证磁浮列车高速、安全地运行,并能根据运行中车辆、线路的状况随时调整运行计划、迅速处理运行中的各种突发事件,列车的运行控制就必须自动进行。磁浮交通运行控制系统按照已存储的行车时刻表对列车运行进行中央自动化控制,包括按照时间和地点准确操纵列车的牵引和制动过程。常规的列车控制任务不是由司机操作的,而是完全由运行控制系统来执行。因此,该系统具有很高的自动控制和防护特性,一般无需人工干预列车的运行,只是在需要清除故障时,才需要控制人员按操作顺序进行人工干预。

运行控制系统在整个磁浮交通系统中的作用是:保障列车运行安全,提高系统运行效率和管理水平。在磁浮交通系统运行过程中,运行控制系统处于核心地位,整个系统的示意结构如图2.7-24所示。



图 2.7-24 运行控制系统在磁浮交通运行中的核心地位

4.1 组成

磁浮列车运行控制系统由3层结构组成:第1层是位于

控制中心的中央控制系统；第2层是位于牵引变电所或道岔房的，与牵引区段对应的分区控制系统；第3层是位于列车上的车载运行控制系统。运行控制系统的基本组成结构可用图2.7-25表示。

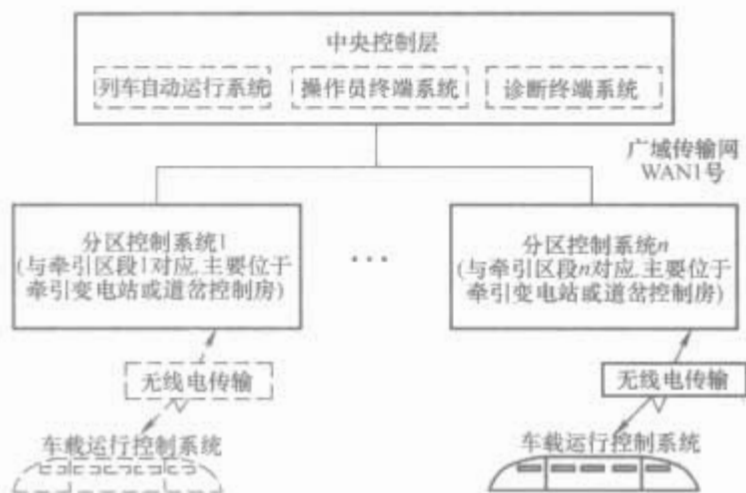


图 2.7-25 运行控制系统的基本组成结构

中央控制系统主要包括列车自动运行系统、操作员终端系统、诊断终端系统和中央无线电系统等子系统，主要负责安排行车计划，编制运行图。它根据线路条件按计划发出列车；当出现故障或冲突时，根据情况的变化改变或撤销计划；通过比较预定计划和实际运行情况，实现整个系统的优化运行。为了保证计划的正常执行，中央控制系统通过数据传输设备从分区的控制系统取得各种信息，进行计算分析并提出运行调整计划；同时，中央控制中心还负责向乘客发布列车运行信息。

分区控制系统主要包括分区控制计算机、分区安全计算机、分区牵引切断计算机、分区道岔模块、分区传输计算机和分区无线电系统等子系统。它的功能是保证本区段内列车的运行安全，对本区段各种设备状态进行监控和维护，将各种信息传给中央控制系统，并在非计划情况下执行运行控制中心的指令，对设备状态和列车行车运行进行人工干预。该系统在车上借助轨道上的数字编码化的位置标记准确地测定列车的位置，不断监控列车是否超过了允许速度的限制。如果超过，则系统会自动切断相应供电区间的电源。如果需要，还可以开启列车制动装置，保证列车运行安全。此外，系统还可以确保路段上列车之间的距离，保持道岔及车站里的人员安全，以及保证运营设施其他功能的安全。

车载运行控制系统主要包括车载安全计算机、车载传输计算机和车载无线电系统等子系统。它的主要任务是对各种车载设备进行检测和控制，保证它们正常工作。通过移动无线传输，车上的列车保护系统始终与分区控制系统保持联系。同时，它也与中央控制系统保持无线通信联系，随时将列车运行状况数据传给运行中央控制中心，并接受后者对行车计划的调整命令。车载运行控制系统的监控设备会随时比较当前的运行数据和计划运行数据，一旦两者的差别超出了允许范围，就启动列车保护系统，使列车迅速减速或停车。

3层结构之间的连接和数据传输在地面利用轨旁光纤网实现，在地面和列车之间的通信利用无线电传输系统实现。无线电台天线杆安装在导轨旁边，间距数十公里。通过无线电天线杆沿着轨道的特殊排列，能够保证列车上的两个天线总是同时处于两个无线电台天线杆的接收和发射范围内。

4.2 功能

运行控制系统的功能包括操作与显示、列车自动运行、

驾驶顺序控制、进路防护、道岔防护、牵引切断、列车防护、定位功能和速度曲线监控等，如图2.7-26所示。

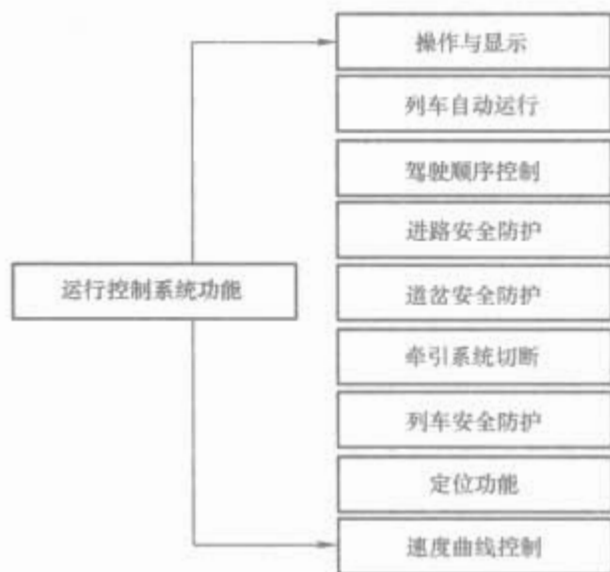


图 2.7-26 运行控制系统的功能

4.2.1 各功能模块的功能

4.2.1.1 操作与显示（OD）

操作员终端系统（OTS）为中央控制系统操作员提供了完善的人—机交互手段，主要指操作与显示。

操作是指在OTS的控制台上接受操作员指令，操作员指令将被解析并发送给相应的运行控制功能模块进行安全处理。控制台上的操作与显示需要遵循一定的防护规程，终端系统将逐条检查并记录操作员命令组成的操作序列。

显示是指显示磁浮线路平面图与全线列车的运行状态。为了确保操作指令发送和列车运行状态显示的高可靠性和安全性，在中央控制子系统与分区控制子系统之间的信息传输中采用了序列号和校验码等技术。

4.2.1.2 列车自动运行（ATO）

ATO功能的作用是减少操作员的手动操作，提高列车运行管理的效率，减少人员差错对列车运行的影响。列车的正常运行根据预先准备好的时间表进行，根据列车运行状况（列车移动、时间），ATO把时间表中包含列车驾驶所需的必要命令发送给运行控制系统的执行模块。列车自动运行功能可以执行操作与显示功能（OD）中的常规命令，但是出于安全考虑，一些重要的与安全相关的操作员命令是不会被直接下达的。

ATO主要功能包括自动进路设置、列车管理和时间表编辑。自动进路设置依据设计数据和运行状况来决定应发布的命令，是列车自动运行的核心功能模块；列车管理实现与列车相关数据的更新，并发送给操作员控制台进行显示；列车自动运行功能所采用的时间表由时间表编辑器生成。时间表数据中包含列车的驾驶命令和特殊的控制指令。

4.2.1.3 驾驶顺序控制

驾驶顺序控制对列车自动运行功能及操作与显示功能所发出的命令进行检查。如果检查通过，则发送给相应的功能模块。与安全相关的命令被传送给列车防护和进路防护模块。驾驶顺序控制就像一个任务分配器，它接收驾驶参数并进行分解处理，然后将分解后的各参数分配到相应的下级功能模块中去。

驾驶顺序控制的主要任务包括轨道控制、列车控制和牵引系统控制。进路设置命令传送给进路防护模块进行检查。如果通过检查，则由进路防护设置进路，并为列车运行确定与轨道相关的参数。最后，确定列车的速度曲线；列车状态将依据运行状况进行控制。在列车自动运行或操作与显示功

能(OD)发出行车指令后,列车的运行就进入了相互调整的阶段。为此,列车必须在系统中进行登录,并且依次发出关门命令、悬浮命令及牵引系统对列车的牵引命令;驾驶顺序控制对牵引系统的状态进行控制,使牵引系统进入必要的运行状态。对列车进行登录或注销,确定牵引系统所需要的牵引参数,包括列车数据、线路数据和速度曲线,并使其可用。将发车和停车点的相关参数发送给牵引系统。

4.2.1.4 进路防护

进路防护的主要任务是为列车分配轨道,并对其进行安全防护。

分配的轨道称为进路,系统在将其锁闭后供指定的列车单独、连续地使用。在操作员控制台上,使用与安全相关的操作员指令可以实现列车行驶所需的轨道区段闭塞与轨道道岔的锁闭。一个分区控制系统(DCS)对应一个牵引分区。对于复线,每个线路区段分为两个牵引分区,相应设置两个分区控制系统。为了便于轨道管理及操作与显示,轨道被细分为较小的区段,并设置属性。

进路防护是分区安全计算机(DSC)的一项任务,它负责管理并防护该分区控制系统范围内的轨道。为此,要求随时可以得到轨道状态的当前信息。这些状态包括分区控制系统区域内的轨道区段状态和道岔状态与位置。

4.2.1.5 道岔防护

道岔防护功能得到道岔的当前状态,并将该状态安全地在中央控制系统的操作员控制台上显示。在正常运行时,道岔移动请求在执行前必须由进路防护功能进行检查,以判断该请求是否允许。道岔的防护、控制和监视由位于道岔边的分区道岔模块(DSM)进行实时控制。

道岔防护的任务包括道岔解锁,可靠地识别道岔端点位置并锁闭,防止任何无意的或偶然的解锁和端点位置脱离。分区道岔模块接收来自分区安全计算机的道岔移动命令,并向分区安全计算机报告安全的道岔端点位置。移动操作由发往道岔的请求触发,并通过向道岔机(SC)提供移动电源来实现。在到达最终位置并锁闭后,移动电源以故障—安全方式被切断。在锁闭状态下,如果移动电源未被激活,道岔就不能离开其端点位置。这样,道岔就得到防护,可以供运行控制系统继续使用。

由于只有移动电源被解锁后,道岔才能离开其端点安全位置,而移动电源的解锁需要分区道岔模块和分区安全计算机的共同作用,因此当分区道岔模块或连接道岔机的数据链路发生故障时,列车的通行不会受到影响。在向分区道岔模块发送“移动”命令之前,分区安全计算机中的道岔状态被设置为“移动中”,因此车辆不允许通过该道岔。如果在道岔的最大允许移动时间内没有安全的端点位置被识别和报告,则道岔状态将变为“未定义”,道岔状态保持不可通过。如果在“移动”命令发出后,分区安全计算机和分区道岔模块之间的数据链路发生故障,则在分区安全计算机重新收到分区道岔模块端点位置报告之前,道岔“移动中”状态将一直保持,从而防止车辆的通过。

4.2.1.6 牵引切断

磁浮运行控制系统中使用分区牵引切断(DPS),在必要时切断牵引供电。它保证了在任何运行模式下执行切断后,都不会再有牵引电流或制动电流流向轨旁电缆。

在下列运行情况下,必须能够对列车牵引系统进行安全切断:

(1)当车速超越列车最大允许速度时,将牵引安全切断,使用列车安全制动让列车减速。

(2)在车速低于最小运行速度时,将牵引切断,利用动能和势能使列车安全地到达当前(前方第一个)停车点。

(3)当操作员在中央控制室或列车驾驶室的控制台上实施手动制动时,将牵引安全切断。

当列车运行中出现需要进行安全牵引切断的情况时,分区安全计算机撤回牵引供电释放命令,分区牵引切断立即安全地切断牵引供电。这个动作是通过电子切断和电气切断两部分实现的。

4.2.1.7 列车防护

列车的防护功能涉及系统中列车的登录、状态、安全悬浮、运行模式和安全制动等内容。

(1)列车的登录。列车开始运行前,必须在运行控制系统中登录,声明其位置和方向。操作员负责对列车进行登录。在异常情况下,可能需要对列车进行重新配置。在列车登录或再配置时,操作员输入的数据被传送给列车。

在列车登录后,系统还需要对其位置和方向进行校验。只有在通过校验后,运行控制系统对列车的定位数据才被认为是安全数据。位置和方向的校验是以一种称为“插入运行”的方式来进行的。

(2)列车的状态。列车的状态可分为运行、停止和静止3种。在每一个牵引区段或分区控制区段内,每一个时刻只允许一列磁浮列车处在运行状态,但可以允许另外的、最多达12辆车分别处于停止和静止状态。

在列车进入运行状态之前,运行控制系统必须为运行列车分配牵引系统,预锁闭轨道,并在通过规定的检查后允许列车悬浮。

列车的停止状态是指系统已为其预锁闭好轨道,列车已准备运行或刚刚中止运行的状态。当一个分区内已有一列列车处于运行状态时,则该分区的控制设备将允许有一列列车处于停止状态;当一个分区内没有列车处于运行状态时,则分区控制系统可允许有两列列车处于停止状态。

列车的静止状态是指列车占用了一个轨道区段,列车的位置和方向等数据已被运行控制系统所知,但列车尚未进行插入运行检查。

(3)列车的安全悬浮。从广义来讲,磁浮列车的悬浮就好像是汽车松开手闸,即完成了运行前的准备活动。在正常运行中,列车悬浮必须满足3个条件,即定位系统工作正常,在列车防护功能中不存在强迫停车或停机的原因,以及该列车牵引系统分配好这3个条件。

(4)列车的运行模式。磁浮列车的运行模式分自动运行模式、有牵引的维护运行模式和无牵引的维护运行模式3种。

自动运行模式为默认运行模式,它包括列车防护完全控制下的所有运行状况;有牵引的维护运行模式是一种特殊运行模式,它允许列车在预定的区段内以限定的速度运行,并忽略来自列车控制单元的强制停车或停机原因。在该模式下,定位系统和速度曲线监控功能必须能正常工作;无牵引的维护运行模式是一种维护模式,它在操作员愿意承担责任的情况下执行某些列车功能(如悬浮、开门等)。在无牵引的维护运行模式下,分区控制系统必须确保牵引系统已被安全地切断。

只有在列车处于“静止”时,才能对列车运行模式进行改变。列车防护功能识别列车模式改变的请求,并在执行前检查前提条件是否满足。

(5)列车的安全制动。速度曲线监控模块确定所需的制动性能,并传递给列车防护功能。列车制动共分为“0~7”

8 个级别，其中“7”代表制动被关闭，“0”表示制动能力为 100%。当列车行驶速度低于规定的着陆速度时，车辆就会落到轨道梁上，靠车体底部的滑橇滑动前进。

4.2.1.8 定位系统

磁浮列车定位系统共有 8 个定位通道，分别位于列车的两端，而中间车厢没有类似的定位装置，如图 2.7-27 所示。

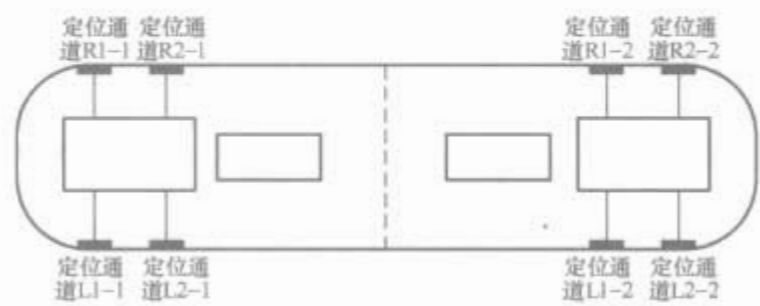


图 2.7-27 列车定位通道位置

(1) 定位通道。定位通道 R1-1、R2-1、L1-1、L2-1 位于头车 1 端，与列车定位 1 相连；定位通道 R1-2、R2-2、L1-2、L2-2 位于头车 2 端，与列车定位 2 相连。

每个定位通道由 3 个部分组成，它们是 INCVLO 测量装置、齿槽测量装置和定位电子设备。INCVLO 测量装置用以读取轨道定位标志板信息，齿槽测量装置用以读取轨道长定子齿槽里程脉冲信息；定位电子设备与上两个测量装置相连，将信息传送到车载安全计算机。

(2) 定位功能。列车定位是用来安全地确定列车的位置和速度的。它接收来自速度曲线监控功能的定位参数，这些定位参数包括关于定位标志板的标识信息，以及它们在轨道上的绝对位置；同时它也提供列车定位状态、列车位置、列车速度、列车行驶方向等信息。

定位功能处理来自轨道梁上长定子齿槽的里程脉冲。该信息在列车通过安装在轨道上的定位标志板时被校正。通过将结果同速度曲线监控功能的定位参数相比较来获得列车的安全位置。

4.2.1.9 速度曲线监控

速度曲线监控功能对列车当前位置的速度进行监视，以确保列车速度在任何时刻均处于所设定的速度范围之内，即处于安全驾驶状态。

根据进路防护的轨道数据和列车数据，速度曲线监控功能确定列车的位置数据和速度数据。

速度曲线监控功能由分区控制系统和车载运行控制系统共同实现，分别在分区安全计算机（DSC）和列车安全计算机（VSC1 和 VSC2）中执行。

速度曲线监控功能监视线路允许的最高速度，以及到当前停车点所需的最低速度。通过由最大允许速度和最低所需速度构成的速度范围，确保列车不进入危险速度区域。在正常运行时，所允许的速度范围始终处于系统的安全监视之下。

4.2.2 各功能模块之间的关系

前面简要介绍了运行控制系统的基本功能，这些功能之间的关系可通过图 2.7-28 形象地表述。图中椭圆形框内为 OCS 功能，矩形框内为外部组件。OCS 功能之间的线条表示需要传送的信息，也可以说是下级功能正常工作的一些前提条件。

在操作员控制台上，显示该 OCS 管辖内所有车辆和轨道的当前状态。基于状态显示和运行需要，操作员执行相应的指令，以实现列车的手动驾驶。操作与显示功能负责接收操作员的输入指令，并作为驾驶参数向下传送。



图 2.7-28 运行控制系统功能模块之间的关系

在正常运行中，驾驶参数无需操作员手动输入，而由列车自动运行功能根据时刻表来确定。

驾驶顺序控制功能对驾驶参数进行处理，分别给出车辆参数、轨道参数和牵引参数。前两项参数分别传递给列车防护和进路防护模块，而牵引参数则发送给牵引系统。

进路防护根据轨道参数设置并监视进路。为此，进路防护从道岔防护中读取道岔的当前位置和状态，并根据需要向道岔防护发送移动命令。列车移动信息用于轨道占用追踪和进路解锁。控制台显示并接收驾驶员的输入。一旦列车速度超限，则起动车载安全制动功能。

定位系统利用定位标志板和里程脉冲增量确定列车的当前位置和速度，并将该信息提供给速度曲线监控系统。

速度曲线监控是运行控制系统的核心防护功能。它根据列车数据和线路数据计算出所允许的速度限界，并利用列车位置和速度信息来监视该速度限界。一旦速度限界被超越，则将该超限报告给牵引切断和列车防护，牵引切断将对轨旁的牵引系统进行安全切断，当超越最大速度限界时，列车防护还将激活列车安全制动。

4.3 中央控制系统

4.3.1 设备

中央控制系统主要由操作员终端（OTS）、列车自动运行（ATO）和诊断终端（DTS）等设备组成。

4.3.1.1 OTS

操作员终端的主要作用是实现运行控制系统的操作和显示功能。操作员终端的用户界面在操作员终端上提供，参考计算机被用作过程保护显示。出于安全性考虑，由两台参考计算机共同工作。所有用于中央控制的计算机都连接在广域传输网（WAN1 号）上，如图 2.7-29 所示。

操作员终端 1 和 2 及参考计算机 1 和 2 位于中央控制中心。维修区的操作员终端位于维修基地的维修控制中心。参考计算机除设有监视终端外，其他硬件结构与操作员终端相同。

4.3.1.2 ATO

列车自动运行的计算机称为功能计算机。

列车自动运行的主要作用是尽量减轻操作员在操作员终端上的操作，并确保磁浮列车行驶时要占用的轨道能及时、正确地预定。另外，列车自动运行系统发送实时显示数据给操作员终端系统作及时更新。

列车自动运行系统的状态在操作员终端上显示。列车自动运行系统基于时间表及列车位置完成进路预定。时间表包括开始运行时间及指定列车运行细节的一些数据。时间表数

2) 从操作的对象来讲,在操作员终端上可以执行的操作员操作分为对列车的操作、对轨道的操作、对列车编号的操作和其他操作:①对列车的操作包括车载设备的设置、内部照明开闭、设置和取消运行要求、指定最高速度、设置和删除发车指令、车门锁闭和解锁、为某分区控制系统或某列车设置或取消紧急停车、选择运行模式、测试制动、列车登录等。②对轨道的操作包括设置和取消进路预锁闭、检查进路、操作道岔、切换牵引模式、设置和取消停车指令、对标记信息的操作等。③对列车编号的操作包括输入、删除、替换列车编号和结束列车等待状态等。④其他操作包括解锁和测试分区牵引切断、设置系统中的列车总数、评估安全显示等。

(2) 显示功能。操作员的操作是基于操作员终端上显示的磁浮系统的当前状态。在过程视图中,操作员终端系统以线路模拟图的图形形式显示轨道情况和运行设备。因为需要命令释放的操作必须是故障—安全的,所以就要求过程状态的显示是无错或安全的。这可以通过所谓的规程防护方式来实现。操作员终端系统的显示是基于分区控制系统和列车自动运行系统所提供的信息,在视图中,以图形方式显示。内容包括轨道区段、道岔区段、分区控制系统区域、牵引分区区域、停车点、列车状态、标注信息及整个系统的运行状态等。

- 1) 轨道区段的信息显示包括轨道区段的静态信息、当前状态(占用或闭塞等)、预锁闭请求和停车点指示等。
- 2) 道岔区段的信息显示包括道岔区段的静态信息、当前状态(占用或闭塞等)、预锁闭请求和道岔位置等。
- 3) 分区控制系统区域的信息显示包括分区控制系统的区域边界、标识和初始状态等。
- 4) 牵引分区区域的信息显示包括牵引系统的状态、分区牵引切断状态等。
- 5) 停车点的信息显示主要是列车停车点和运行停车点。
- 6) 列车状态显示是指对列车编号、运行状态,以及相对时间表的运行偏差等信息的显示。

4.3.2.2 ATO 功能

列车自动运行的主要功能可以分为自动进路设置、列车管理和图形用户界面(GUI)3种。

- (1) 自动进路设置。自动进路设置是列车自动运行的核心功能,主要任务是根据预先设置的数据,以及系统的当前状态检查自动进路设置请求,并决定要发出哪些命令。
- (2) 列车管理。列车管理由列车追踪、列车位置和状态显示,以及列车编号的操作等几部分子功能模块组成。列车管理通过这几个模块,实时地更新磁浮列车的相关数据,并把它们发送给操作终端系统显示。
- (3) 图形用户界面(GUI)。GUI包括时间表的执行和列车运行显示。时间表定义了在某一段时间内列车自动运行系统控制列车运行的行驶情况。时间表包括一般操作(即不需要命令释放的操作)、宏(操作的序列),以及特殊的列车自动运行系统命令。时间表数据可以显示在显示器上,并根据具体要求作相应改变。列车运行显示是对一个计划内的运行的详细描述。如当前日期、时间、列车编号、时间表数据、当前列车正在执行哪条命令等。

4.3.2.3 DTS 功能

诊断部件分析诊断源发来的信息,并以此为依据确定基本的逻辑故障视图(即故障信息)。这些信息连同其他的附加信息一起存储在数据库里。附加信息包括故障位置、处理状态、具体操作员或负责人,以及发生故障的时间和日

期等。

所有故障无论其被排除与否,都会被归档。这些记录都可以作为以后分析的依据。诊断部件没有用户显示界面,诊断程序在后台运行,而且它可以识别多个诊断源的消息。

服务部件是基本的人机界面,它显示诊断部件提供的故障。操作人员通过在服务部件上的相关操作处理故障。所有故障以列表的形式表示,对于每个所选的故障,发生的时间、位置、受影响的部件都会显示出来。在诊断软件内的浏览窗口,可以选择每个单独的计算机或计算机的某一个部件,在这种情况下,列表只会显示所选部分的故障。当故障被排除后,相关信息会在故障列表中被删除。

诊断信息报文的发送是定时的,即每隔一定时间,诊断源会发送一次诊断报文。即使诊断源没有故障信息,同样也需要发送一次。这个报文称作周期性报文。如果在一段时间内都没有收到周期性报文,则系统认为连接到该诊断源的路径中断,然后把它的状态设为未知。

4.4 分区控制系统

4.4.1 设备

运行控制系统的分区划分要与牵引系统的分区划分相对应,并配置相应的设备。这些用于分区控制的运行控制设备被称为分区控制系统。分区控制系统中包含用于列车控制、监视和防护所需的全部功能和技术设备,它的主要设备位于牵引变电所中。分区控制系统的系统构成和相互关系如图2.7-32所示。

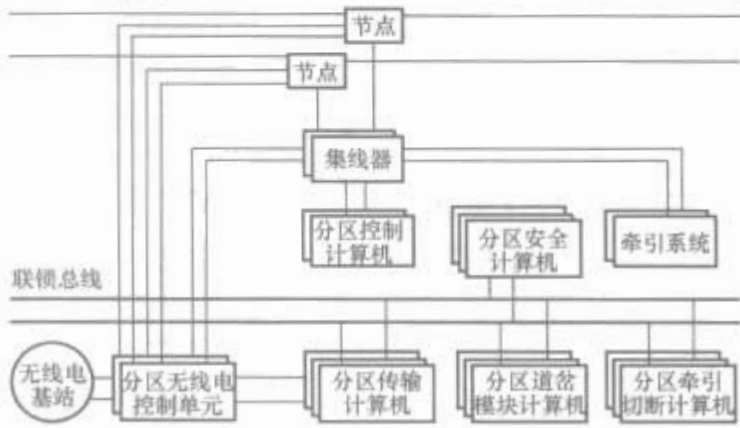


图 2.7-32 分区控制系统的系统构成和相互关系

由图2.7-32可知,分区控制系统主要由分区控制计算机(DCC)、分区安全计算机(DSC)、分区牵引切断(DPS)、分区道岔模块(DSM)、分区传输计算机(DTC)和联锁总线(IL-BUS)等设备组成。

4.4.2 分区控制系统功能

运行控制系统是一种兼有安全防护功能的控制系统,与安全相关的功能主要通过分区控制系统和车载运行控制系统来实现。分区控制系统的功能主要有驾驶顺序控制、进路防护、道岔防护、列车防护、列车速度曲线监控(地面部分)及牵引切断等。

4.4.2.1 DCC

分区控制计算机负责对每个分区操作的控制,它涉及的操作部件有车辆、轨道和牵引系统。DCC根据操作员的手工设置或列车自动运行功能的设置作为相关部件确定参考值。DCC的主要功能有控制列车操作、检查和发送中央控制系统(CCS)的报文、控制列车、控制牵引系统、控制轨道和管理系统状态等。

DCC由两台计算机、一台磁盘阵列和存储信道组成,如图2.7-33所示。两台主备用计算机协同工作,当一台计

算机出现故障时,另一台计算机切换得到现有进程继续工作,这样保证了系统的安全性和稳定性。

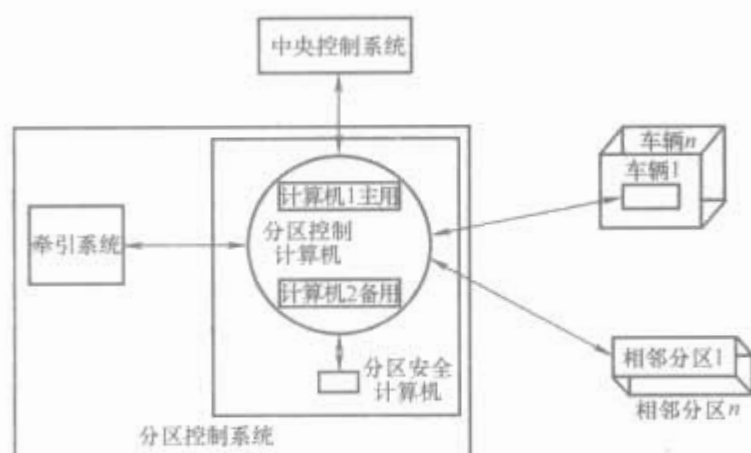


图 2.7-33 分区控制计算机的结构及其与外部的接口

DCC 的硬件及系统软件配置与 ATO 的硬件及软件配置相同。

4.4.2.2 DSC

DSC 执行分区控制系统的核心功能,它的主要任务是对分区控制系统所属区域内的列车和进路进行防护,其中进路防护包括牵引切断和道岔防护功能。DSC 的具体任务有轨道保护、列车管理、安全操作与显示和牵引切断。

在一般情况下,DSC 所执行的功能主要取决于操作员的命令,执行完后再把操作的状态发回到中央控制中心。

DSC 采用“多数表决”机制的安全计算机,主要完成以下功能:

(1) 轨道防护。这一功能主要是检查进程的设置和可用性,监督列车的移动及轨道区段的释放等。主要分为轨道管理和进路防护两部分。

1) 轨道管理。轨道区段是在 DSC 中逻辑划分开的一些区段,如图 2.7-34 所示。每一个轨道区段都有一个相关的状态,如占用状态、预定状态、闭塞状态、空闲状态等。另外,相对于道岔这种特殊区段,它有一些额外的状态标识,如安全状态、移动状态、特殊操作状态和位置未知状态等。DSC 根据中央控制系统的命令改变轨道区段的状态或执行进路防护功能。

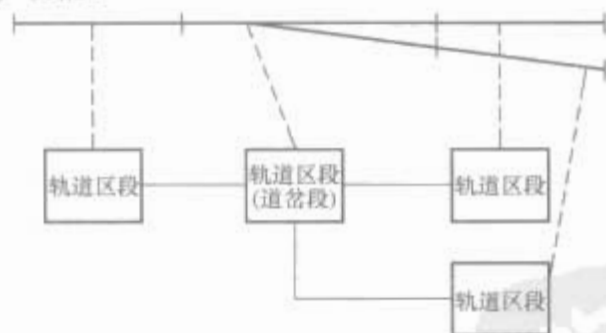


图 2.7-34 轨道区段示意图

2) 进路防护。进路防护是 DSC 中的核心功能,它从技术上保证列车的安全进路和行驶。进路由运行控制系统预先设定并且防护的一段运行路线,且该段运行路线不能被其他列车所占用。对一条进路的检查是看这条进路从起点到终点是否正确,组成进路的轨道区段是否都是可通行的。如果进路检查没有问题,就可以建立这条进路。一条进路必然对应一列列车,因此进路建立后,只允许这列列车通过。

(2) 列车管理。DSC 以列表形式保留所属区域内已知的所有列车的记录。在该列表中,每一列车的信息将被实时更新,包括列车标识、当前车辆位置、车辆内部状态和无线电连接的状态等。

列车管理的内容包括列车完整性检查、列车状态管理、

列车登录、分区切换和列车运行模式管理。

列车运行模式管理。列车有 3 种运行模式,即自动运行模式、有牵引的维护运行模式和无牵引的维护运行模式。自动运行模式是一般运营时的模式。带牵引的维护运行模式忽略了一些紧急制动的条件,其他与自动运行模式没有什么区别。而当列车处于不带牵引的维护运行模式时,这一分区内的所有列车都不能移动,因为在这个时候,系统会要求这个分区内的所有牵引系统全部切断,不提供牵引动力。

(3) 安全操作与显示。安全操作与显示是通过一种称之为“命令释放”的机制实现的。这种机制保证中央控制系统的当前过程视图及命令操作是正确的。

“命令释放”主要是针对一些比较重要的命令。系统在执行前,要求操作员对该条命令作出确认。另外,对于这些命令系统,会给予一个序列号,通过检查序列号的连续性,确保所有的命令都能执行。

(4) 发出牵引切断命令。鉴于整个系统故障—安全的原则,有很多理由都会引发系统的牵引切断,比如车地之间的通信中断,列车的速度高于最高速度曲线或低于最低速度曲线,在移动道岔的过程中道岔没有达到预定位置等,都会从 DSC 发送牵引切断命令给分区牵引切断计算机。

4.4.2.3 分区牵引切断(DPS)

在接收到分区安全计算机的切断命令或与分区安全计算机的通信发生故障时,分区牵引切断计算机负责安全地切断牵引系统,以确保在任何运行状态下牵引或制动电流都不会进入牵引系统的轨旁电缆。

DPS 分为两种模式:一种是电子切断,另一种是电气切断。电子切断是发送一个切断信号给牵引电路。当收到这个信号后,牵引系统调整电流为零;然后,分区牵引切断计算机反馈电流。如果反馈的电流超过了限定值,则会进一步引发电气切断。电气切断是把牵引系统的电路全部切断,保证电流为零。

分区牵引切断使用的计算机是“多数表决”机制的安全计算机。其主要功能有命令解析、安全牵引切断和外围设备测试等。

4.4.2.4 DSM

DSM 的作用是对道岔进行保护,其主要任务包括转发由分区安全计算机发来的移动道岔命令给道岔机,确认道岔到达预定的位置并锁闭,防止意外的道岔移动操作,以及防止意外激活道岔驱动模块等。

DSM 使用的计算机同样是“多数表决”机制的安全计算机。它具有一般和特殊两种运行模式。

在一般运行模式中,DSM 只接收由 DSC 发来的移动道岔请求,然后由分区道岔模块监督道岔机的移动情况。分区道岔特殊运行模式一般用在维护、维修及安装阶段。在这种模式下,道岔能在现场进行操作。

4.4.2.5 DTC

车辆与地面之间有很多信息需要及时传送,比如车辆要向地面系统发送位置信息,地面要向车辆系统发送各种操作指令等。这些信息传输都需要一个可靠的传输媒介作保证。在磁浮系统中,使用高频无线电传输手段。图 2.7-35 是车地之间信息传输通道的示意图。

运行控制系统的车地信息交换绝大多数是车载安全计算机(VSC)与 DSC 之间的信息交换,而它们之间的信息交换必须通过车载传输计算机(VTC)、车载无线电控制单元、分区无线电控制单元和 DTC 实现。图 2.7-35 中的虚线部分为高频无线电传输。

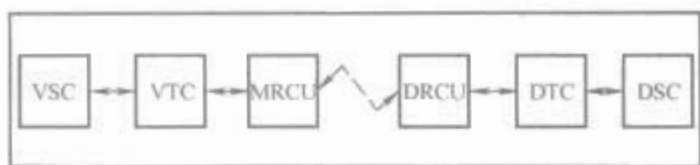


图 2.7-35 车地之间信息传输通道

VSC—车载计算机；VTC—车载传输计算机；MRCU—车载无线电控制单元；DRCU—分区无线电控制单元；DTC—分区传输计算机；DSC—分区安全计算机

分区道岔模块使用的计算机也是“多数表决”机制的安全计算机。DTC 主要完成数据的管理、发送和接收等功能。

4.4.2.6 联锁总线 (IL-BUS)

联锁总线是一种具有故障—安全特性的总线结构方式的数据传输设备，在磁浮控制系统中，主要用于地面安全计算机设备之间的数据安全通信，即分区安全计算机、分区道岔模块计算机、分区牵引切断计算机及 DTC 之间的数据通信。

计算机通过电缆或光纤连接在联锁总线上。在同一时间，只有一台计算机可以发送数据。所有联锁总线计算机的地址是通过硬件跳针来实现的，因此保证了传输地址的正确性和安全性。

4.5 车载控制系统

4.5.1 车载控制系统设备

车载运行控制系统是指设在磁浮列车上的运行控制系统，它包括位于列车两端的两套车载安全/传输计算机 (VSC1/VTC、VSC2)。车载运行控制系统设备采用冗余配置。在正常情况下，车载运行控制系统的主要功能由 VSC1 完成，而 VSC2 则处于热备用状态。

车载运行控制系统与其他的控制部件一起协同工作，保证了列车的安全操作。图 2.7-36 显示了车载运行控制系统的所有部件。

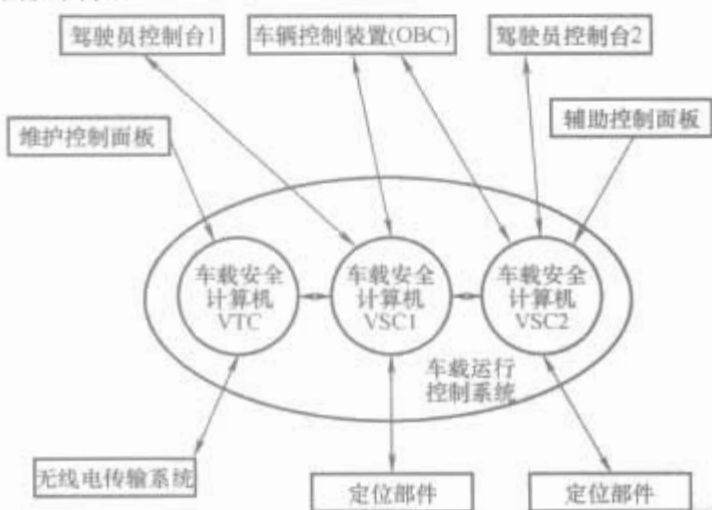


图 2.7-36 车载运行控制系统

驾驶员控制台与列车定位部件是通过串行方式连接到 VSC1 和 VSC2 上的。车辆控制装置 (OBC) 则通过数字输入/输出电路与 VSC1 和 VSC2 相连。维护控制面板的状态以数字信号形式送到 VSC1 中去。同样，辅助控制面板的状态以数字信号形式送到 VSC2 中去。

4.5.2 车载控制系统功能

车载控制系统主要功能包括列车定位、列车速度曲线监控 (车载部分)、强制停车管理、运行模式切换、列车悬浮、列车静态监控、涡流制动、列车辅助控制与释放、车载控制装置监控、受流装置释放及列车车门监控等。下面从车载控制系统的组成部分开始逐一分析其功能。

4.5.2.1 VSC

VSC 与 VTC 及无线电系统一起协同工作。每一个 VSC

都必须有正确的定位信息，其中 VSC1 起主要作用，它通过 VTC 与分区控制系统 (DCS) 保持通信；VSC2 只是一个备用。如果 VSC1 发生故障，则 VSC2 会得到控制权，负责把列车停在下一个停车点。

VSC 同样采用“多数表决”机制的安全计算机。VSC 需完成的功能主要有列车的起动与停止、紧急停车管理、改变运行模式、列车悬浮、辅助控制面板、涡流制动、监督 OBC 及车门监督等。

(1) 列车的起动及停止。列车在启起时通常要进行如下一些工作：

- 1) 与 VTC 建立通信。
- 2) 在 VSC 之间建立通信。
- 3) 起动车载供电设备。
- 4) 检查 OBC。
- 5) 检查制动装置。

(2) 紧急停车管理。有很多原因会造成列车的紧急停车，如 VSC1 故障，车地之间的通信中断等。根据原因的不同，VSC 会选择不同的停车方式。

(3) 改变运行模式。前面讲过，列车的运行模式有三种：自动运行模式、有牵引的维护运行模式和无牵引的维护运行模式。VSC 可以根据中央控制系统的命令改变列车的运行模式。

(4) 列车悬浮。列车的悬浮操作相当于释放列车的制动。在悬浮指令发出后，VSC 会在一段时间内等待 OBC 的支撑及导向信号。在这段时间内，列车会保持一个“等待”状态，以防止车辆移动。列车悬浮必须满足 3 点要求：必须有足够的、安全的定位信息，没有紧急停车的信号存在，DCS 工作正常。

(5) 辅助控制面板。如果有特殊需要，可以用辅助控制面板通过 VSC2 对列车进行控制。这时，操作员对列车的行车安全负责。

(6) 涡流制动。当发生紧急停车时，列车会启动涡流制动功能。涡流制动分 8 个等级，分别对应 0~100% 的制动能力。VSC 会根据当前的情况决定制动等级。

(7) 监督 OBC。这一功能只能由 VSC1 来完成，它主要监督 OBC 的制动检查信号、性能检查信号、停车信号和火警信号。

(8) 车门监督。在自动运行模式及有牵引的维护运行模式中，如果列车处于停车及非悬浮状态，则列车会根据分区控制计算机或驾驶员的要求释放车门。这时，在无牵引的维护运行模式中，只有驾驶员通过列车驾驶台才能对车门进行控制。

4.5.2.2 VTC

VTC 负责车载安全计算机与车载无线电控制单元之间的信息传输。VTC 与分区传输计算机相对应，采用相同的硬件配置和具有相似的数据处理功能，即从列车的角度，实现车地之间通信的信息管理、发送和接收功能。

4.6 运行控制系统数据通信

运行控制系统的通信子系统由有线数据传输系统和无线移动通信系统两部分组成，其中主要包括广域传输网、联锁总线和 38GHz 无线电传输系统。联锁总线已包含在分区控制系统中，下面主要对广域传输网和 38GHz 无线电传输系统作简要介绍。

4.6.1 有线数据传输系统组成及功能

广域传输网用于连接中央控制系统的所有部件及分区控

制系统中的 DSC，如图 2.7-37 所示。

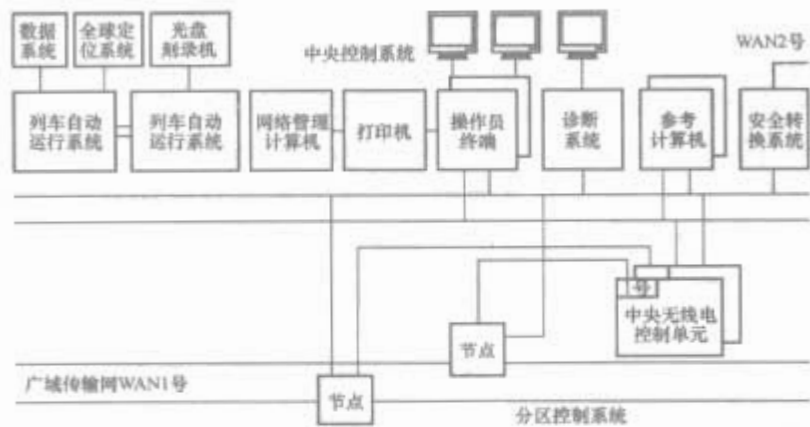


图 2.7-37 连接在广域传输网 WAN1 号上的部分计算机

广域传输网由两条光纤环路组成。环路上有若干个接口节点用于连接计算机。在中央控制机房，有一台网络管理计算机用于管理网络。网络管理计算机显示网络的拓扑结构，检查网络的传输情况。当网络有故障时，它可以显示故障的大致位置。

4.6.2 无线移动通信系统组成及功能

无线电传输系统在磁浮车辆与地面系统之间建立一种可靠的、双通道的数据传输途径。这个传输途径可以传送操作控制数据、牵引控制数据、诊断数据及旅客信息数据，同时为车辆和控制中心的操作人员提供语音服务。

无线电传输系统沿轨道及在列车的两端架设天线，用来传输无线电信号。这种系统使用的无线电频率为 38GHz，是目前专为高速磁浮交通设计的。它包括中央无线电控制单元（CRCU）、分区无线电控制单元（DRCU）、光纤网（OFN）、地面无线电基站（RBS）和车载无线电系统 5 个部分，如图 2.7-38 所示为无线电系统结构图。

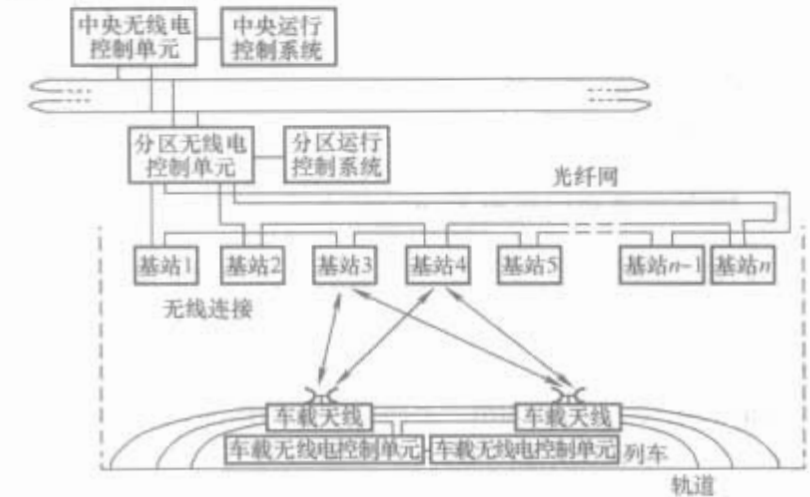


图 2.7-38 无线电系统结构图

4.6.2.1 CRCU

CRCU 亦称中央无线电系统（CRS），位于中央控制室。它是传输旅客用户信息（PIS）、诊断信息及语音信息的接口。其核心部件是工业控制计算机。

CRCU 可以收集无线电系统的诊断信息，并结合自己的信息向诊断系统报告情况。另外，可以在中央无线电控制单元上直接查看简单的无线电系统各部件的状态。

4.6.2.2 DRCU

DRCU 亦称分区无线电系统（DRS），被连接到分区控制系统上，并在一个特定的区段内控制无线电传输。无线电光纤网的结构与分区控制系统的区域相对应。DRCU 与该区域内的所有无线电基础 RBS 相连，并通过无线电基站的信号收发与列车上的移动站保持通信。

DRCU 同样以工业控制计算机为核心部件。为了保持与列车的不间断通信，并提高这种通信的稳定性，每一辆磁

浮列车同时与轨道旁的两个 RBS 保持通信。这两个 RBS 处于不同的网络里，它们接收几乎同样的信息。这样可以保证在任何一个单独基站或网络发生故障时，都不会影响车地之间的通信。图 2.7-39 表示了车地间的无线电连接方式。

4.6.2.3 OFN

DRCU 控制一组 RBS，这些 RBS 分布于轨旁。无论列车运行于轨道上的任何一点，都同时有两个相邻的 RBS 与它保持通信。光纤网用于分区无线电控制单元与 RBS 的连接。

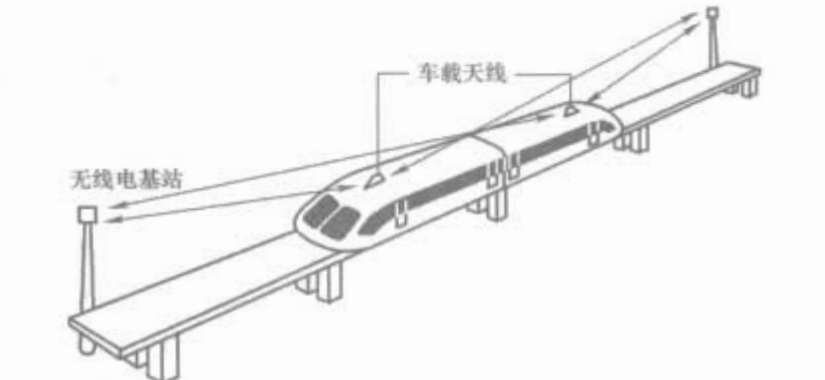


图 2.7-39 车地间的无线电通信方式

4.6.2.4 RBS

RBS 架设在轨道的旁边，每隔一段距离架设一台，架设时必须做到无线电无盲区覆盖。RBS 由天线杆、连接盒、基站收发器、基站控制器及基站天线组等组成。连接盒位于天线杆的底端，内有电源变压器，为所有 RBS 设备提供电源。基站控制器置于连接盒中，它接收光纤网络中的数据报文。如果是发给本站，则接收；如果不是，则转发给下一个站。另外，它还将基站收发器收到的信号经光电转换后利用 OFN 发送出去。基站收发器控制天线信号的收发功能。每个基站有 4 个天线，它向两个方向各发送两组不同频率的信号，同时，每个方向接收一组信号。

4.6.2.5 车载无线电系统

车载无线电系统由天线屏蔽器、车载天线组、车载收发器及车载无线电控制单元（MRCU）4 部分组成。屏蔽器是车载无线电系统的可见部分，它位于列车前后两端顶部。车载收发器位于天线下方，它与基站收发器具有相同的功能，通过 RS232 接口与 MRCU 连接，实现数据及控制信号的收发。

5 磁浮交通牵引供电系统

5.1 分类

根据运行速度，磁浮列车分中低速磁浮列车和高速磁浮列车。中低速磁浮列车以日本的 HSST 为代表，国防科技大学和西南交通大学研制的磁浮列车也属这一类，列车采用短定子直线电机牵引，运行速度在 160km/h 以下。高速磁浮列车以德国的 TR 型为代表，日本的 MLX 磁浮列车也属这一类。列车采用长定子直线电机牵引，速度在 500km/h 左右。相对应的牵引供电系统也分为两类：中低速磁浮交通牵引供电系统和高速磁浮交通牵引供电系统。

中低速磁浮列车采用直流 750V 或 1500V 给车辆供电，牵引逆变器和牵引直线电机定子安装在车上，车辆通过受流器从轨道两侧的供电轨受流，牵引供电系统与“城轨交通牵引供电系统”基本一样。

德国 TR 型高速磁浮列车的长定子沿整个轨道敷设，主变流器安装在地面牵引变电所，只是 160km/h 以下时通过

供电轨给车上的悬浮与辅助设备提供全部或部分能量。时速在 160km/h 以上时完全由车上发电线圈供车上设备用电。日本 MLX 低温超导磁浮牵引供电系统与此类似，主要差别在于德国 TR 定子绕组有铁心，而日本 MLX 的定子绕组是空心的，牵引供电系统的结构与控制方式基本一样。

本节主要以上海高速磁浮运营线 TR 型牵引供电系统来叙述。除特别指明外，文中所指的牵引供电系统均指高速磁浮列车牵引供电系统。

5.2 牵引原理

磁浮列车采用直线电机牵引。直线电机是由旋转电机演变而来的，它的基本构成和工作原理与普通旋转电机相似，将旋转电机沿半径方向切开展平，其旋转磁场变成了水平移动磁场，旋转运动也就变为直线运动方式。

磁浮列车的牵引电机主要有直线感应电机（LIM）、直线同步电机（LSM）、直线磁阻电机（LRM）和 Z 形单极直线同步电机等，后两者很少采用。日本的 HSST 系列磁浮列车使用的是直线感应电机，它的初级绕组装在车体上，次级装在轨道上。因为初级定子绕组较短，故又称短定子直线电机。德国 TR 型系列磁浮列车采用长定子同步直线电机牵引。电机的电枢绕组沿轨道敷设，故称为长定子，励磁绕组安装在车体上，如图 2.7-40 所示。

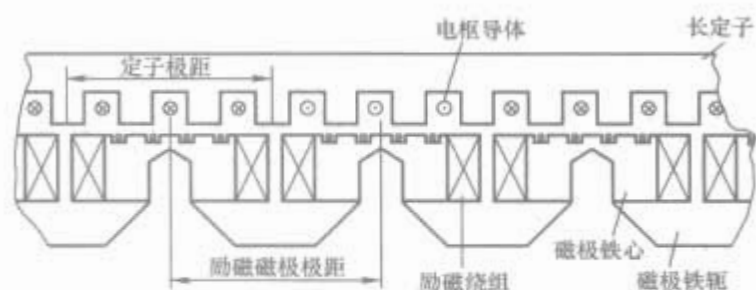


图 2.7-40 长定子直线电机的结构图

图 2.7-41 所示为磁浮列车长定子直线电机牵引原理图，当定子线圈通以三相交流电时，产生平移磁场。平移磁场与励磁磁铁产生的磁场相互作用产生列车高速行驶所需的牵引力。为了提高电机功率因数，在轨道旁设有开关站，通过牵引系统控制，只对列车所在的那一段定子绕组供电。此外，车上的磁铁模块内还附有车载发电线圈，当列车高速运行时，发电线圈发出电能，通过整流和升压后为车载设备提供电力。

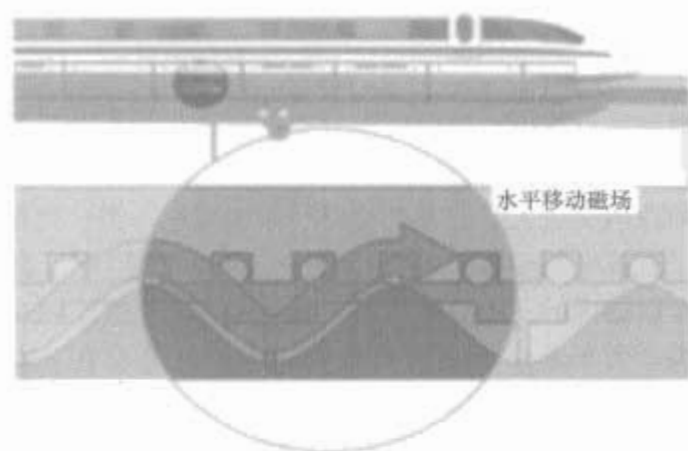


图 2.7-41 磁浮列车长定子直线电机牵引原理

5.3 结构与功能

牵引供电系统为磁浮列车提供运行时所需要的牵引功率，是磁浮交通的重要组成部分之一。

图 2.7-42 是一个牵引区间的牵引供电系统的结构图。系统有 3 部分：供电系统、牵引模块和轨旁设备。牵引模块由电机控制、系统诊断、数据通信、变流器控制、变流器功率部分等组成；轨旁设备由轨旁开关柜、馈电电缆、长定子电机等部分组成。牵引供电系统的设备有分布在轨道两旁的牵引变电所、开关站及轨旁变电所。图 2.7-42 中所示的牵引区间有两个牵引变电所（变电所 n 和变电所 $n+1$ ）及相关的轨旁设备。一条长线路就是由这样的牵引区间连接而成的。

图 2.7-43 是一个典型的三步法牵引供电系统系统的原理图。牵引供电系统先将 110kV 的公用电网通过变压器降压为中压 20kV（上海采用）或 35kV，经过整流变压器降压，再经整流器和逆变器变为频率与幅度可调的交流电，通过输出升压变压器后经供电电缆、开关站供给线路上的长定子电机的定子线圈。定子线圈产生的磁场与车上的悬浮电磁铁作用产生列车所要的牵引力或制动力。

牵引变流系统的工作状态来自运行控制系统（OCS）命令，对输出电流、频率与相位进行实时控制，从而实现对磁浮列车牵引力的有效控制，使列车严格地按照设定的路程—速度曲线高速、安全运行。

供电系统中还设有辅助电源给站内控制系统、辅助设备及动力轨供电。沿线经有轨旁变电所给开关站、无线通信站、道叉及辅助停车点动力轨供电。采用无功功率补偿装置和谐波滤波器减小牵引变流设备对供电电网的不利影响。

在变流器的输入和输出端各配置有一套 DPS（decentralized propulsion shut-off）开关，又称安全切断开关。安全切断开关受控于运行控制系统的 DCC，完全独立于牵引控制系统，在紧急情况下切断牵引供电系统，保证在任何运行模式下执行牵引切断时不再有牵引电流或制动电流流向轨旁电缆和电机的长定子，从而在不受牵引影响的情况下，列车依靠涡流制动和机械制动安全停车。

5.4 磁浮交通牵引供电系统的特点

高速磁浮交通供电系统和牵引系统都设在变电所内，变电所在线路旁沿线设置。变电所间的距离与线路坡度、运行速度、发车间隔时间及变电所的类型相关，不同的条件下变电所的间距可为 5~50km。上海 30km 的线路设有两个牵引变电所，一个在龙阳路，另一个在浦东机场。

与轮轨列车不同，高速磁浮交通主变流器和长定子电机定子是牵引供电系统的一部分，都不安装在车上，而是分别安装在变电所和轨道上。这样简化了车辆的结构，减小了车辆质量，增加了车辆的承载能力，同时避免了高速受流的问题，主变流器的重量和体积不再受到空间限制，使高速磁浮交通有着高速和节能的条件。

为了提高电机的功率因数，同时减少有功功率损耗，长定子采用分段供电。分段供电由轨旁开关站内的开关切换。综合考虑到牵引供电系统的工程成本、列车的速度要求和运行舒适性，定子分段切换采用不同长度和切换控制方法。

高速磁浮交通牵引供电系统主要由供电系统、牵引变流系统、馈电电缆、轨旁开关和直线电机长定子绕组等部分组成，将供电、牵引控制及定子的分段切换集中为一体，同时牵引控制系统还要与列车上和地面运行控制系统实时通信，传递控制所需的各种信息。因此，无论是从系统结构，还是从控制方面来看，都要比干线电气化铁路和城市轨道交通牵引供电系统复杂得多。

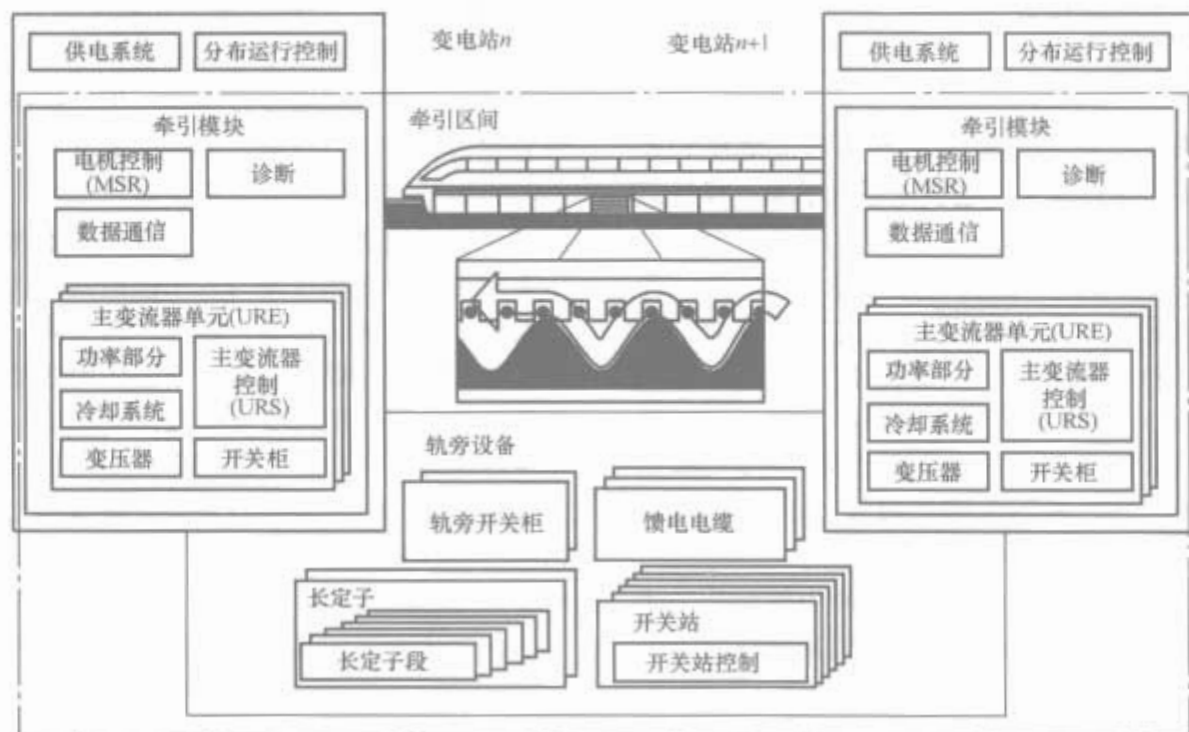


图 2.7-42 牵引供电系统的结构

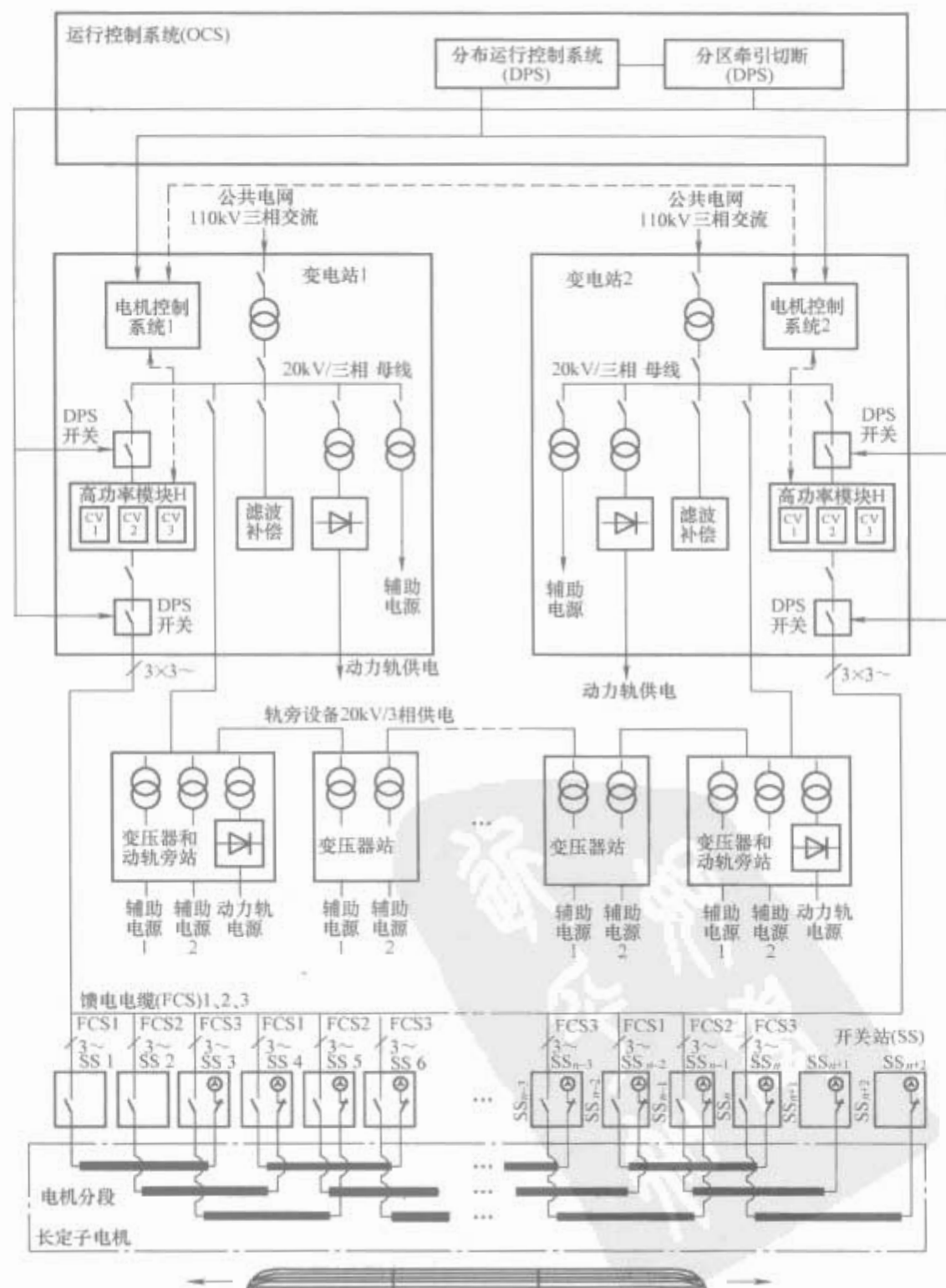


图 2.7-43 牵引供电系统的原理框图

按照功能将牵引供电系统分为如下几个部分：主变电所供电系统、牵引系统和轨旁设备。

5.5 主变电所供电系统

主变电所供电系统完成 110kV 高压到中压的降压和牵引系统配电，其结构与城市轨道交通供电系统基本一样，只是负载类型上有所差别。

上海 30km 的线路设有两个主变电所，图 2.7-44 是一个主变电所的供电系统简图。主变电所从两路独立的公共电网引入 110kV 电源，经过 110V/20kV 变压器，降压为两路 20kV 中压电网，形成磁浮列车的供电电网，分别供给两套主变流器及相关负载。当一路公用电源停电或 110kV 降压变压器故障时，两路 20kV 中压电网可以通过连接开关接通，保证牵引系统的正常供电，维持列车的运行。

变电所的主要负载是主变流器模块，除牵引模块外，还包括轨旁变电所设备、动力轨供电设备和辅助电源设备的供电。

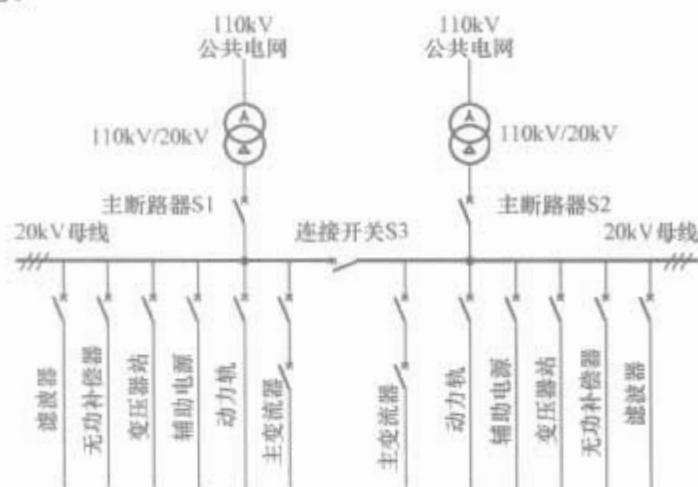


图 2.7-44 供电系统简图

此外，还接有静态滤波器和动态无功补偿器，消除主变流器产生的谐波电流和无功电流，使电网电压和电流畸变满足国家有关标准。在没有中线接地的中压电网中，还应设置为中性点接地专门的接地变压器。

5.5.1 供电系统的自动化系统

自动化系统利用通信和网络对电压、电流、无功、开关状态及故障状态进行监视和存储；对开关进行远距离分合闸控制；当线路发生故障时，对故障线路进行识别和隔离。与其他应用不同的地方是，高速磁浮交通的自动化系统要将供电系统的重要信息传递给牵引控制系统，供牵引控制使用。

上海线采用了德国西门子公司的 SICAM SAS 变电所自动化系统。该系统由一个变电所控制器（substation controller）和数个终端单元（bay unit）通过网络连接而成。变电所控制器是自动化系统的核心，负责终端控制器、站内操作人员及调度中心的通信。终端单元安装在配电室各设备旁，实现数字式保护、电量和开关状态检测及开关控制单元。变电所控制器与调度中心由以太网连接，通过 ICE60870-5-101 规约通信，与站内操作人员工作站通过 Profibus 通信，与终端单元按 ICE60870-5-101 规约通过 Profibus 通信。

5.5.2 过电压保护、防雷与接地

电网运行过程中会出现内部过电压和外部过电压。内部过电压会破坏电气设备的绝缘，引发电网故障。供电系统在 110kV 高压侧和 20kV 中压侧母线设有氧化锌避雷器以吸收雷击和操作过电压。国家标准 GB 311—1983《高压输变电设备的绝缘配合、高电压试验技术》对各级电压下设备的绝缘试验电压水平进行规定，设备的绝缘配合符合国家标准：

交流电气装置的过电压保护和绝缘配合按 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》执行。

主变压器和牵引变电所防雷接地与变压器的工作接地合二为一；主变压器屋顶设避雷针带，牵引变电所屋顶设避雷带和避雷针，下引线通过外墙引下并与接地网连接。

110kV 主变压器和牵引变电所 20kV 母线通过接地变压器中性点接地电阻接地；低压接地系统按 TN-S 制连接，低压系统接地由自然接地与人工接地共同构成。自然接地由变电所建筑物主体（钢筋）组成，在不同标高处用热镀锌钢板预埋，与主钢筋焊接，将主钢筋作为接地电极引出。人工接地将主变电室和牵引变电所在户外连成一体，然后分别引至建筑物内与户内接地干线相连。变电所内辅助变压器中性点直接接地，所有电器设备外壳、电缆桥架、金属管件、建筑物门窗等都要接地。

5.5.3 波滤波装置

磁浮供电系统品质必须满足国家标准 GB/T 1459—1993《电能质量公用网谐波》的要求。当主变流器采用整流器供电时，对电网会产生谐波污染，需要安装谐波滤波装置消除谐波电流。

上海线牵引系统采用了双十二脉波整流器，所以主要谐波电流为 11、13、23、25 次，因为整流器绕组的不对称和整流器的动态调节会产生少量的 5、7 次谐波电流，同时考虑到低次谐波电流可能在高次谐波支路的放大，因此在 20kV 中压侧设有 5 次、7 次单调谐及 11 次高通滤波支路，图 2.7-45 是上海线谐波滤波和无功补偿装置结构。滤波装置由无源器件电感、电容和电阻构成，除有滤波功能外，同时补偿基波无功功率。龙阳路和浦东机场每套大功率模块 20kV 侧设有一套谐波滤波装置，滤波器总容量为 6Mvar，5、7 次及 11 次支路的容量别为 1、1Mvar 和 4Mvar。

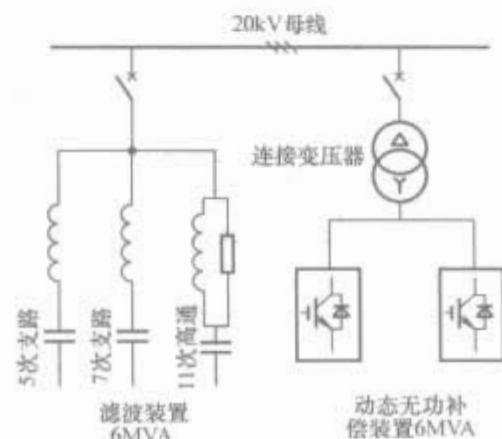


图 2.7-45 上海磁浮线谐波滤波和无功补偿装置结构

5.5.4 动态无功补偿装置

国家《电力系统电压和无功管理条例》对供电系统高压部分功率因数要求 0.9 以上，国家标准 GB 12326—2000《电能质量 电压波动和闪变》对电网的电压波动和闪变也做出了严格的规定。主变流器采用相控整流的牵引系统，在产生谐波电流的同时，也会产生无功功率。高速磁浮列车速度快，牵引供电容量大，无功变化频繁，需要适应高速磁浮交通供电的这一特点，传统的静态无功补偿是不能满足要求的，需要采用响应速快的动态无功补偿装置。

如图 2.7-45 所示，上海磁浮线采用有源无功补偿器实现动态无功补偿。动态无功补偿装置通过连接变压器与 20kV 电网相连。每套牵引模块有一组动态补偿装置，容量为 6Mvar，可以输出连续变化的超前或滞后无功功率，动态响应速度小于 60ms，与滤波装置的静态无功补偿配合可以

实现 0~12Mvar 的连续无功补偿。每一个变电所动态无功与静态无功补偿配合,实现 0~24Mvar 的无功补偿。补偿后,功率因数大于 0.92,使主变电所的主变压器有载调压开关调压次数减小,电网电压波动满足要求。

每组动态无功补偿器由两台 3.15MVA 的连接变压器和 10 台 600kVA 的 IGBT 动态无功补偿模块构成。如图 2.7-46 所示,每个变压器低压侧有 5 组绕组分别与 5 台动态无功补偿模块相连。动态无功补偿模块通过 CAN 总线接受来自无功检测单元的无功命令,独立工作,发出与命令一致的无功功率。在模块故障时,无功检测单元根据故障模块的数量重新分配无功命令的大小。

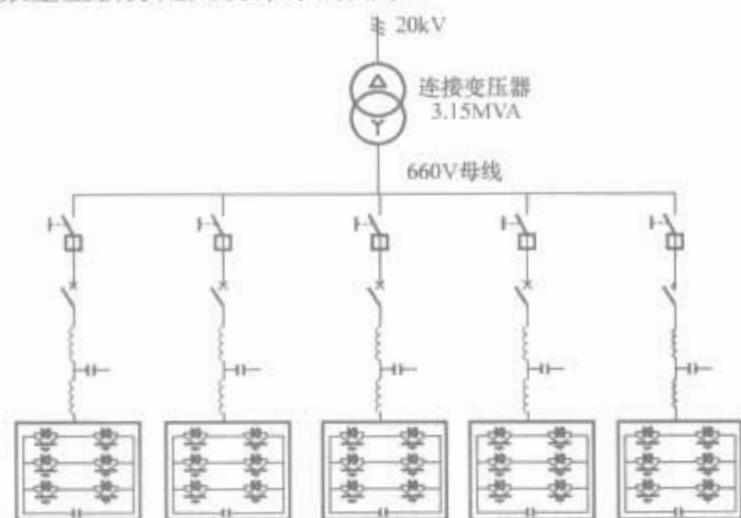


图 2.7-46 一组动态补偿器的结构图

如果采用四象限变流器作为主变流器,通过控制可以实现功率因数为 1,不仅不需要加装无功补偿装置,而且同时还可以根据电网的无功需求,向电网提供无功功率,保持电网稳定。可以采用 PWM 的多重化技术减小四象限变流器产生的谐波电流,这样可以不用谐波滤波器或只需装小容量高次滤波器就可以满足国家规定的有关谐波电压和电流标准。此外,采用四象限变流器,可以使列车再生能量很容易回馈至电网,提高列车的运行效率。

5.5.5 辅助电源

辅助电源是三相 400V 交流电,站内辅助电源通过站内辅助电源变压器将 20kV 降压得到,供给所有的辅助设备(如空调、照明等)、牵引控制和运行控制系统用电。轨旁辅助电源由轨旁变电所供电。

5.5.6 动力轨供电

当高速磁浮列车在 160km/h 以下时,车上发电线圈发出的电能不够供车上设备使用,要通过受流器从动力轨获取部分或全部电能。动力轨供电为 400V 直流电,由 20kV 降压变压器降压,再通过三相二级整流后得到。动力轨只安装在车站起动段和一些辅助停车点,供列车起动时车上的设备用电。

5.6 牵引系统

牵引系统包括主变流器和牵引控制系统,将供电系统 20kV 的工频交流电变换为电压、频率和相位可变的交流电,供给长定子同步直线电机,实现磁浮列车的牵引和制动控制。

根据牵引过程中定子段的换步方法不同,主变流器功率模块所包含的主变流器单元的数量也不同。当采用两步法时,模块中有两个主变流器单元;当采用三步法时,模块中有三个主变流器单元。

主变流器单元是主变流器的基本单元,实时控制主变流器单元输出电压和电流的幅值、频率和相位,通过轨旁馈电

电缆和轨旁开关站向电机段供电,控制列车的运行。变流器单元由输入变压器、主变流器及其冷却系统、输出变压器和输出开关柜构成,其中主变流器又包括整流器、中间直流环节、斩波制动环节和逆变环节。

5.6.1 牵引变电所

牵引变电所是放置主变流器及牵引控制系统的建筑物。根据主变流器中功率模块的配置和供电区间不同,牵引变电所分为 I 型和 II 型牵引变电所两类。

I 型牵引变电所只能有选择性地向左侧或右侧的牵引供电区间一个方向供电,对于每条轨道,只装备一套牵引功率模块,根据列车所在的位置向列车当前所在的牵引区间供电。I 型牵引变电所适用于列车发车间隔较长的牵引供电区间。

如图 2.7-47 所示,上海线有 a、b 两个轨道,5 个牵引供电区间,在龙阳路和浦东机场各分设 1 个牵引变电所,其中龙阳路牵引变电所是典型 I 型变电所。每个变电所均有两套大功率模块分别给两个轨道供电,正线区间 1 和 3 由两个牵引变电所双边并联供电,而区间 2 由龙阳路的大功率模块供电。区间 4 由浦东机场变电所设置的一套中功率模块,供电还有一套小功率模块给维修基地的区间 5 供电。II 型牵引变电所与 I 型站不同,可同时为变电所左、右两侧的牵引区间供电。浦东机场变电所是 II 型。对于每条轨道而言,每个牵引变电所要两套牵引供电模块。这类变电所适合发车间隔较短的线路,特别适用于需要双边馈电的场合。

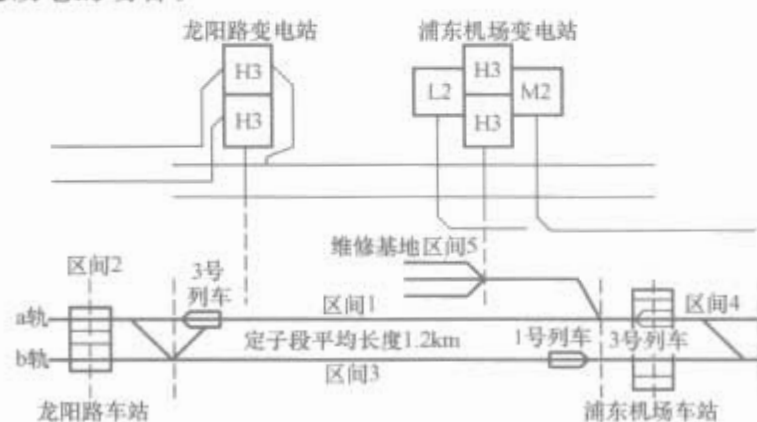


图 2.7-47 上海高速磁浮牵引变电所的配置

H3—3 个大功率模块; M2—两个中功率模块;

L2—两个小功率模块

5.6.2 主变流器

为了更经济地利用牵引功率,根据加速能力和最高速度的不同要求,主变流器分为大功率、中功率和小功率 3 种。对应主变流器单元不同,牵引模块分为大功率牵引模块、中功率牵引模块和小功率牵引模块。

(1) 大功率牵引模块,简称大功率模块。因为牵引中采用的长定子换步方法的不同,一套大功率模块由两个或 3 个大功率变流器单元组成,每个单元包含有输入开关柜、输入变压器、主变流器、输出变压器和输出开关环节。大功率模块适用于牵引能力要求大的线路上,需要高加/减速能力和高速运行的牵引供电区间。图 2.7-48 是上海线大功率模块,包括 3 个大功率变流器单元,每个单元容量为 15MVA,用三步法向正线牵引区间供电,最高速度达到 430km/h。

(2) 中功率牵引模块,简称中功率模块。一套中功率模块由两个或 3 个大功率变流器单元组成。中功率模块适用于加速度和运行速度不是很高的牵引供电区间供电,无输出变压器,每个变流器单元功率是大功率变流器单元的 1/2。

如图 2.7-49 所示,上海线浦东机场牵引变电所的中功率模块有两个中功率变流器单元,每单元容量为 7.5MVA,采用两步法向浦东机场站牵引区间供电。

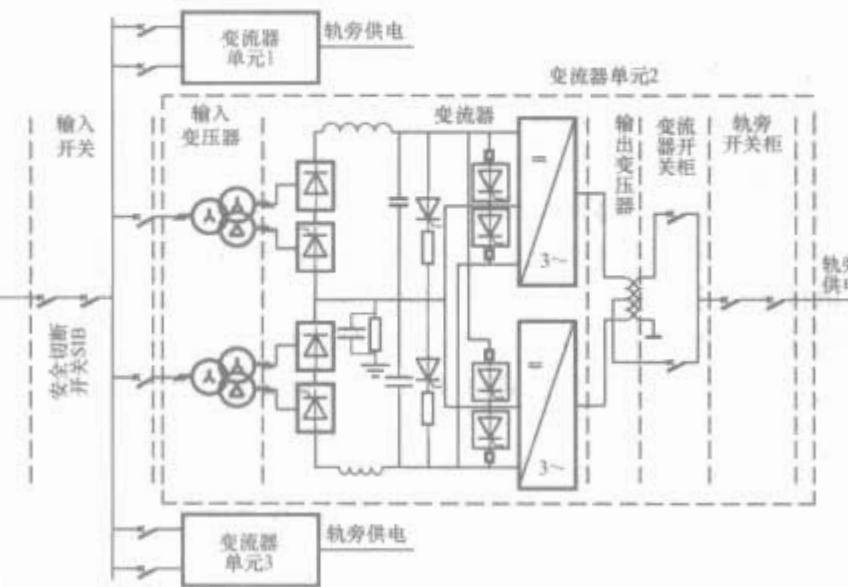


图 2.7-48 大功率模块

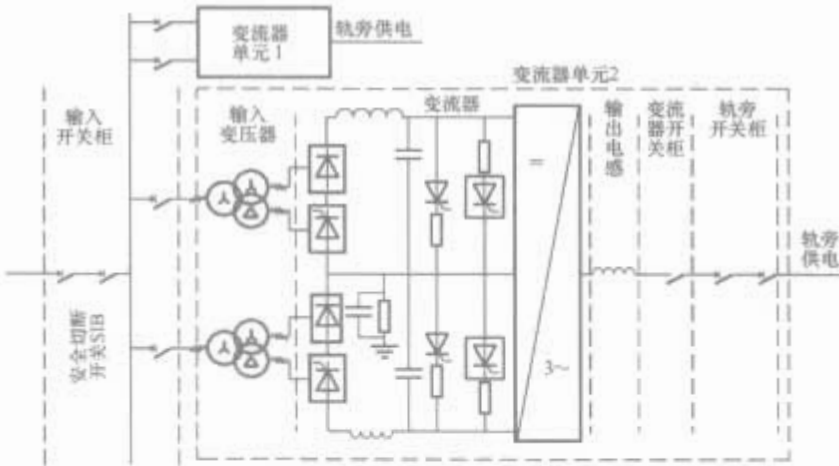


图 2.7-49 中功率模块

(3) 小功率牵引模块,简称低功率模块。用于向加速要求低和运行速度低的牵引供电区间供电,最大速度大约为 10km/h。通常为 400V 交流输入的标准工业逆变器,直接向牵引区间供电。上海线维修基地有一个小功率模块,由两台 200kVA 的逆变器组成,以两步法牵引列车在维修基地内移动。

5.6.2.1 输入开关柜

输入开关柜在 20kV 中压侧,连接 20kV 电网母线与输入整流变压器,给牵引变流系统供电。输入开关柜有安全切断开关和主变流器输入开关;安全切断开关受控于分区牵引切断开关。如图 2.7-48 所示,为保证安全切断开关可靠,安全切断开关采用两台真空断路器串联,在主变流器输出开关柜内,也有同样的安全切断开关,输入和输出安全切断开关同步操作。上海线的大功率主变流器单元输入开关柜断路器的额定电压为 20kV,额定电流为 1.2kA。

5.6.2.2 大功率主变流器单元

如图 2.7-48 所示,大功率主变流器单元由输入变压器、主变流器、输出变压器和输出开关柜构成。

(1) 输入变压器。输入变压器又称整流变压器,一次侧接 20kV 中压,二次侧接主变流器的整流器。上海线输入变压器采用干式变压器,铁心为五柱心结构,减小 3 次谐波磁通引起的损耗。二次侧两组输出,额定电压为 1.084kV,一组为 Y 接法,另一组为 Δ 接法,相差 30° ,分别接两组三相变流器。为了减少二次侧绕组间的影响,采用分裂式结构,这一结构同时可以限制二次侧短路电流。每个大功率主变流单元有两台输入变压器,每台额定容量为 10MVA,短路阻

抗为 15%。另外,中功率模块和小功率模块也有输入变压器,只是容量不一样。

(2) 主变流器。变流器是主变流器单元的核心,是一个交—直—交变流器,由整流器、中间直流环节、斩波器和逆变器构成。整流器先将 1.084kV 4 组电压变成 3000~5000V 的直流电压,再经两组三电平逆变器变换为两组频率、相位和幅值可调节的三相交流电,再通过输出变压器和输出开关柜由馈电电缆和开关站向长定子供电。

1) 整流器。整流器将输入变压器输入交流变为直流电,经中间环节滤波后供给逆变器。每个大功率主变流单元有 4 组整流器,其中两组为三相二极管桥式整流,另外两组为三相晶闸管全控整流,输入分别接两台输入变压器的两个绕组,输出串联。二极管整流器中的一组接变压器的 Y 接法绕组,另一组接另一台变压器 Δ 接法绕组;全控整流器中的一组接变压器的 Δ 接法绕组,另一组接另一台变压器 Y 接法绕组。这种接法使得注入电网的 5、7、...、 $(2k \pm 1)$ 、... ($k=0, 1, 2, \dots$) 次谐波电流相互抵消,简化了滤波器的结构和容量。整流器输出电压为 5000V,额定电流为 3000A。

采用多重 PWM 整流器取代上述的二极管和相控整流器是发展方向,德国已研制出用于高速磁浮牵引的 PWM 整流器。

2) 中间直流环节。中间直流环节有滤波、储能、解耦和过电压保护功能。整流器输出经 LC 滤波器,减小直流电压纹波。滤波器同时可以使整流器和逆变器解耦,使逆变器瞬时脉冲电流不会传递输入变压器。滤波器的电容还可以抑制逆变器再生制动时直流电压的上升速度,配合制动斩波器工作。为了减小接线电感在功率开关关断时的过电压,中间直流环节的电容通常分为 3 组,分别与 3 个逆变桥臂安装在一起。

中间直流环节还有逆变器的撬棍短路保护环节。当逆变器短路时,除了输入开关柜的断路器分断外,短路保护的晶闸管被触发导通,分流短路电流,保护逆变主电路。

中间电容的中点通过电阻和电容接地,可以降低主电路对地的绝缘等级。

3) 制动斩波器和制动电阻。当列车制动时,逆变器处再生状态,部分能量会回到中间直流环节,提高直流电压,如果采用 PWM 整流器,再生能量可以回到电网,维持直流环节的电压稳定;如果采用二极管和晶闸管整流,必须加制动斩波器,通过斩波器接通制动电阻,将再生能量消耗在制动电阻上。

上海磁浮线每个大功率主变流器单元各接有制动斩波器和制动电阻。每个斩波器与逆变器使用相同的模块单元,额定电压为 5200V,额定电流为 2500A。制动电阻安装在户外,采用空气自然冷却,每个制动电阻值为 2.5Ω (100°C),峰值电流 (1s) 为 1.5kA。

4) 逆变器。逆变器将直流电压逆变成三相交流电,通过输出变压器供给长定子线圈。为了满足同步电机的牵引要求,输出电压的幅值、频率和相位都可以通过控制调节。

上海线一个大功率主变流器单元由两台 7.5MVA 逆变器组成,总容量是 15MVA。每台逆变器输出频率为 0~300Hz、幅值为 $0 \sim \sqrt{2} \times 4.3\text{kV}$ 、电流为 0~1200A、相角为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 可调。逆变器选用 4.5kV/4kA GTO 为开关元件,采用了如图 2.7-50 (a) 所示的三电平结构,逆变器的 3 个桥臂分别装在 3 个逆变柜内。三电平结构容易实现功率器件

的串联均压，同时因为每相输出电压有 3 种电平，如图 2.7-50 (b) 所示，减少了输出电压的变化率，减轻了对电机绝缘的不良影响。在相同的开关频率下，三电平的输出电压和电流谐波也比二电平小，有利于减少牵引力的脉动。

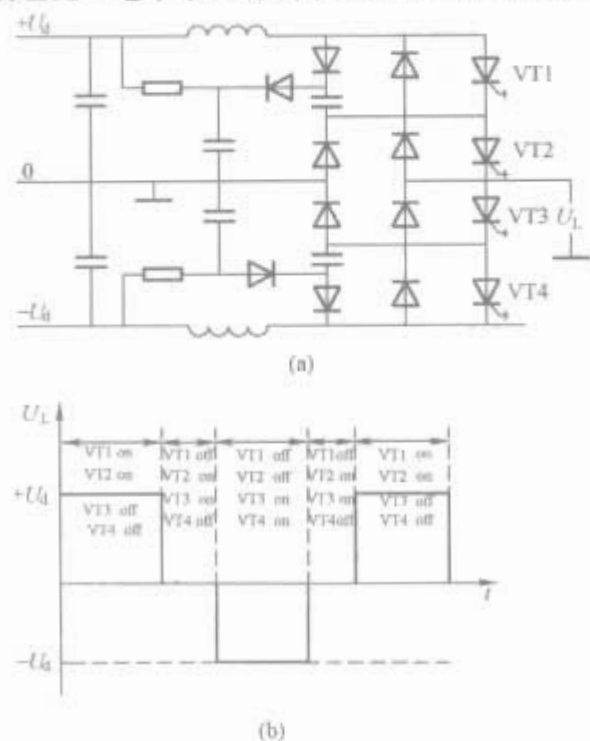


图 2.7-50 三电平逆变器一个桥臂
(a) 三电平桥臂结构; (b) 三电平输出

IEGT (injection enhanced gate transistor) 和 IGCT (integrated the gate drive circuit) 是新型的大功率电力电子器件，在驱动、开关频率、损耗和可靠性几方面都优于 GTO，在大功率应用中将逐渐取代 GTO。日本已开发出以 IEGT 为开关器件的逆变器用于超导高速磁浮列车的牵引，德国用 IGCT 为功率器件研制新一代的高速磁浮牵引逆变器。我国也开发出 7.5MVA 的 IGCT 三电平逆变器和 IGBT 多电平逆变器样机用于高速磁浮试验线。

5) 主变流器冷却。当主变流器工作时，开关器件开通及关断过程中都会产生损耗，开关损耗使器件温度上升，必须采用冷却措施将热量迅速带走，保证芯片温升在安全范围内。主变流器功率大，采用水冷系统较为合适。

上海线每个主变流器单元的整流器或四象限变流器、斩波器和逆变器共用一套水冷却系统，冷却系统由水泵、管路、调节阀、显示控制系统和空调单元等构成。控制系统可以设定主变流器报警和切断温度，当温度超过设定温度时，向监控系统报警或发出主变流器的关断信号，保证主变流器的安全。

冷却系统有去离子交换器，当检测到循环水的电导率超过设定值时，启动去离子装置，降低电导率。防霜管的二次管道通过热交换器吸收热量，再通过空调带到室外。

(3) 输出变压器。列车低速时要求供电电压幅值和频率低，电流大；高速时要求供电电压的幅值和频率高，电流小。为了使逆变器在低速和高速时都能发挥牵引容量，在大功率模块中，逆变器通过输出变压器后再给长定子电机供电。

上海线每个大功率主变流单元有一台输出变压器，变压器的一次绕组两端分别与两个逆变器连接。低速时，两台逆变器相位相同，并联工作，经输出变压器通过一次中点向长定子供电，变压器一次绕组也作为电抗器，有滤波、限制环流和均流的功能。高速时，两台逆变器相差 180° ，相当于串联，通过变压器合成为 5 阶梯波电压，升压后给长定子电机供电。

为了减小相电压和相电流不对称对变压器的影响，输出变压器由 3 个单相干式变压器组成。输出变压器容量为 9.87MVA，一次额定电压为 4.3kV，一次接不同抽头时，变比有 1.6、1.8 和 2.0 三种。正常运行时采用 1.8 的变比，输出电压达到 7.76kV。

(4) 输出开关柜。输出开关柜有输出变压器和长定子馈电电缆，含主变流器的开关柜和轨旁电缆开关柜，开关柜的核心是真空绝缘开关。主变流器开关柜采用真空接触器，根据列车速度要求，通过改变变压器的接法，与逆变器配合可以使变压器在电感和升压两种模式下工作。轨旁电缆开关柜有安全切断开关，采用的是断路器，与输入开关柜的安全切断开关一样，采用双断路器串联，受控制 OCS 的分区牵引切断开关控制，与输入开关柜的安全切断开关同步操作，紧急情况下可靠地切断长定子的供电电流。

5.6.2.3 中功率主变流器单元

如图 2.7-49 所示，中功率主变流单元与大功率主变流单元有基本相同的组成。与大功率主变流器单元相比，中功率主变流器单元容量只有大功率的 1/2，只有一个逆变器，输出变压器被输出电感取代，主变流器开关柜只有一路开关。

5.6.2.4 小功率主变流器单元

小功率单元容量只有 200kVA，用于维修基地列车低速运行。逆变器使用的是工业变频器，因此不需要专门的输入变压器、输入开关柜和输出开关柜。

5.6.3 牵引控制系统

牵引控制系统分布在牵引变电所、轨旁开关站和轨旁变电所内，用于列车的开环控制、闭环控制牵引系统的状态监控，按照运行控制命令和设定值自动运行。图 2.7-51 所示为牵引控制系统的结构图，牵引控制系统主要由电机控制系统、主变流器控制系统、开关站和轨旁供电开关设备的分布控制、人机界面和诊断系统构成，包括 BLT-分布式运行控制系统、MRS-电机控制、URS-主变流器控制、B&B-运行监视、DAD-分布式诊断、SSS-开关站控制、SAS-轨旁供电开关控制。

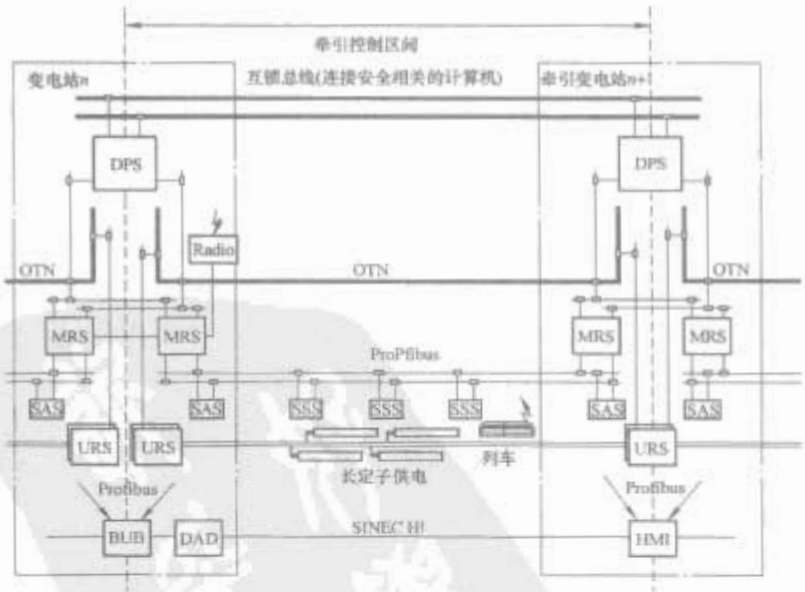


图 2.7-51 牵引控制系统的结构

牵引控制系统各部分通过不同的网络实现数据交换，连接为一个整体，满足牵引控制的要求。OTN (open transport network) 是牵引控制系统的主要网络，电机控制与变流器之间、电机控制与分布运行控制之间及一个运行区间的电机控制间用 OTN 网连接。电机控制系统与列车通过无线通信后由同步 RS485 串行接口连接，与区间内的开关站及轨旁开关设备通过双路冗余 Profibus (现场总线) 连接。运

行监控与变电所内控制系统设备通过 Profibus 连接,与分布诊断系统用以太网连接。此外,在主变流器控制与变流器功率模块间采用 LX40 串行连接,与冷却系统间采用 Profibus 连接。

电机控制和主变流器控制单元设在牵引变电所内,是牵引控制系统的核心,图 2.7-52 所示为上海线电机控制和主变流器控制的结构图。每个牵引区间有自己的电机控制系统,且有两套并联运行,一个为主,另一个为从。正常运行时,两套接受同样的控制命令和反馈信号,进行同样的运算,但只有主系统承担控制任务。在主系统故障时,从系统能立即投入工作,取代主系统完成牵引控制任务。这种热备份的冗余设计,提高了运行的安全和控制的可靠性。

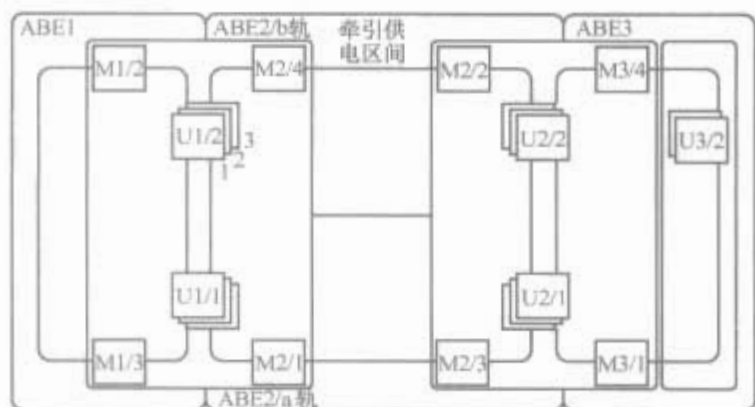


图 2.7-52 上海线电机控制和主变流器控制的结构图
ABE—牵引控制区间; M—电机控制系统;
U—主变流器控制系统

每个主变流器单元有一套主变流器控制系统,每个大功率模块有 3 套主变流器控制系统,中功率模块有两套主变流器控制系统,所以龙阳路变电所有 6 套主变流器控制系统,浦东机场变电所有 8 套主变流器控制系统。

5.6.3.1 电机控制系统

电机控制系统是控制系统的核心,主要完成如下任务:

(1) 高层控制任务。协调主、从电机控制系统的工作,当主系统故障时,从系统取代主系统进行牵引控制。通过以太网接受来自分布式运行控制系统的速度和运行模式数据包,并根据运行控制系统的指令,选择运行自动运行还是手动运行模式。通过运控系统的无线传输 RS485 接收列车的位置和电机转子的相角信号,并根据列车的位置控制轨旁开关站,给直线电机定子段供电。

(2) 车辆的导引任务。按照运行控制系统的指令计算闭环控制中里程和速度的实际值,实施列车精确停车。根据列车的速度指令、加速度或减速度限制,同时考虑舒适度要求,计算所需的牵引力和制动力。

(3) 主变流器的闭环任务。根据列车的位置和牵引力,计算出长定子电机闭环控制的电流大小和相位,此外,定子的同步感应电压也可以计算出来。

5.6.3.2 主变流器控制系统

变流控制系统根据电机控制系统的指令控制,完成如下控制任务。

(1) 主变流器控制。在直接输入模式下,逆变开关频率为 0~70Hz,通过整流器相控角控制直流电压,从而实现输出电压的调节。在变压器模式下,开关频率为 3~300Hz,调节两逆变器的相位,实现输出电压的调节。

无论是在直接模式还是在变压器模式下,要计算逆变器输出电压的空间矢量,优化调制,减小谐波电流,防止谐波电流与馈电电缆发生谐振。

牵引时,闭环控制中间直流环节电压;制动时,控制制动斩波器,消耗制动能量。过电压时,制动斩波器释放过电压。

所有信号要转化为主变流器功率单元内的子单元控制命令,并由子单元来执行。

(2) 输入开关柜控制。实时采集 110kV 和 20kV 的电压和电流信号,对输入开关柜实现控制和保护。控制由输入开关柜控制子模块完成,该模块在输入开关柜内,与变流控制系统采用 LX40 和 Profibus 2 种通信。电压和电流采集由 LX40 传送,开关控制和保护由 Profibus (L2 DP) 来传送。

(3) 主变流器内部控制。实时采集主变流器电压和电流,接收主变流器控制的触发脉冲,触发功率开关器件,实现主变流器过电压、过电流保护和短路保护。控制功能由主变流器内部控制子单元来完成,该模块在主变流器功率内部,与变流控制系统采用 LX40 和 Profibus 2 种通信。电量采集和触发脉冲由 LX40 传送,其他信号由 Profibus (L2 DP) 传送。

(4) 主变流器输出开关控制。实时采集电流闭环控制所需的主变流器输出电流和电压信号,根据逆变器的运行模式要求,切换开关使 2 台逆变器并联在直接模式运行或串联在变压模式下运行。此控制任务由输出开关柜控制子模块完成,该模块在输出开关柜内,与变流控制系统采用 LX40 和 Profibus 2 种通信。电压电流据采集由 LX40 传送,开关控制由 Profibus (L2 DP) 来传送。

(5) 主变流器冷却控制。检测和显示水速和水温,根据设定对变流系统报警或切断。检测循环水的离子浓度,并控制去离子装置的启停。主变流器冷却控制由冷却单元来实现,冷却控制子单元分布冷却系统中,与变流控制系统采用 Profibus (L2 DP) 通信。

(6) 数据通信系统。磁浮交通由运行控制、车辆、轨道与牵引供电四大系统组成,牵引供电与其他系统关系紧密。牵引供电系统内部也有很多子系统,各子系统分布在不同的地点。先进的通信技术为系统提供简化、灵活和可靠的实现方案。根据信息的容量和传输速度的不同要求,牵引供电系统有 5 种不同的通信方式:

1) OTN。OTN 是牵引控制系统的核心网络,用于牵引变电所之间、电机控制器与主变流器控制器之间以及电机控制与分布运行控制间快速同步传递补数据,传送同期为 1ms。除传输速度快外,顾名思义,OTN 有开放性,几乎可以与现有的所有标准通信接口连接,同时采用光纤双环结构,正常时一个环路工作,一个环路故障时另一个环路自动投入工作。此外,OTN 能满足任何其他特殊的服务需求,如语音、数据、LAN、视频等,因此在轨道交通、化工等行业有广泛的应用前景。

2) LX40 通信。电机控制系统与主变流器内部子单元间的通信,传递的信号有主变流器 GTO 的开关信号、保护信号及同内部电流和电压采集信号。主变流器控制系统与输入输出开关柜、轨旁开关站及变电所间也采用 LX40 通信方式传递电压和电流信号。LX40 是速度最快的通信方式,通信周期为 10μs,实时传递主变流器控制所需的各种信号。

3) Profibus 通信。主变流器控制系统与主变流器冷却系统、输入输出开关柜、轨旁开关站间采用 Profibus (L2 DP) 传递开关动作指令及状态信息。与轨旁开关连接的 Profibus 采用了四光纤冗余结构,保证了极高的可靠性。人机界面与主变流器控制单元采用了 Profibus (L2 FMS) 传递信息。Profibus 信号传送周期为 10~100ms,是一种国际

化、开放式、不依赖于设备生产商的现场总线标准，在国内应用非常广泛。

4) 以太网 (SINEC H1)。牵引控制系统与分布牵引运行控制系统间的通信方式传递运行方式与速度指令数据包用以太网连接。诊断系统与操作监视系统也采用 SINEC H1 总线连接。SINEC H1 的通信周期为 1s，是一种高速工业以太网。

5) RS485 通信。牵引控制需要的列车位置与相角信号由运控系统的无线网络传入，再通过 RS485 接口传递给电机控制器。通信周期为 10ms。

此外，分布运控系统间采用与安全计算机互锁的特殊网络，牵引供电系统与运行控制中心采用广域网连接。

(7) 开关站控制。开关站控制器与牵引控制系统中的电机控制通过 Profibus (L2 DP) 连接，根据指令控制开关站内指定的接触分合给对应的定子段供电，同时控制站内的辅助设备，如风扇、加热器开关。控制器对开关站内设备的状态进行诊断、监控和保护；当电机定子线圈或馈电电缆接地时，切除故障段，避免故障扩散，同时故障上报。

(8) 人机界面。高速磁浮列车是一个复杂的大系统，友好的人机界面将给运行和维护人员带来极大的方便。人机界面由牵引诊断系统和运行监控系统构成。

1) 牵引诊断系统。牵引变电所内，每个牵引区间有 1 个诊断控制系统与牵引控制系统一起，运控中心有 1 个诊断中心。每个区间的诊断系统通过以太网与诊断中心连接，与运行监控系统也通过以太网连接。诊断系统对牵引系统部件连续监视，检测所在运行区间的故障，并确定故障的位置，形成部件的故障报告。上海线牵引系统采用了基于模型的故障诊断系统，使维护人员能快速准确定位故障。

2) 运行监控系统。每个牵引模块有一套运行控制监控系统，与牵引控制系统在一起。运行监控系统与牵引系统中每个控制单元通过 Profibus 相连，与诊断系统通过以太网连接。正常运行时，运行监控系统对牵引系统设备实时监控；维护和调试时，对牵引系统进行人工操作，并对状态进行监视。

5.7 轨旁设备

要完成直线电机长定供电，有配套的轨旁设备。轨旁设备有馈电电缆、轨旁开关站、轨旁变电所及长定子电机段。

5.7.1 馈电电缆

馈电电缆将牵引模块与长定子段连接起来，传递牵引所需的能量，馈电电缆的组数与功率模块对应。两步法牵引要两组馈电电缆，三步法时要 3 组电缆，每组电缆有三相，根据容量和阻抗的不同要求，由每相多根单芯电缆并联组成。

上海线采用了 12/20kV 240mm² 的铝芯电缆。

5.7.2 轨旁开关站

轨旁开关站位于定子段的分段交接处，用于切换与定子段供电的馈电电缆，实现对磁浮列车定子段的分段供电。一个标准的开关站内有 4 个 20kV 开关柜和两个电缆中端柜，每个开关柜内有真空接触器、隔离开关和接地开关。其中，两个是馈电开关柜，另外两个是星形接法开关柜。馈电开关将牵引模块的供电母线与定子供电电缆接通，向定子供电。星形接法开关柜将定子段的末端连接，形成星形接法。当定子段故障或要测试时，星形接法开关可以断开。电缆中端柜是一种连接柜，将开关站与牵引供电母线连接在一起。图 2.7-53 是三步法开关站的结构和连接图。

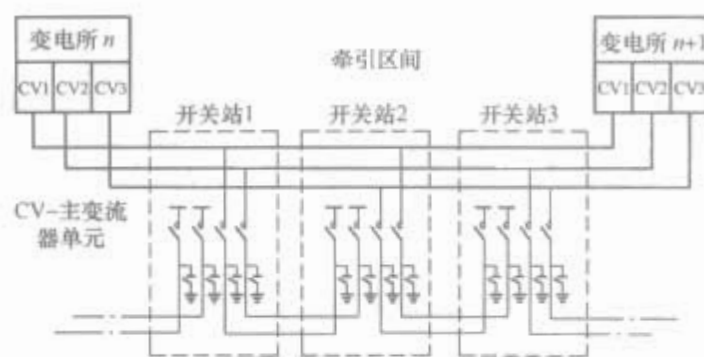


图 2.7-53 三步法开关站的结构和连接图

与标准开关站相比，特殊的开关柜可以有更多的开关柜和电缆终端柜，以便实现不同的供电组合。开关站内需要低压辅助电源、开关站控制单元和接地故障保护系统，必要时还要加装空调设备。

上海线共有 57 个轨旁开关站，其中有 52 个标准开关站，5 个位于控制区分界的特殊开关站。

5.7.3 轨旁变电所

轨旁变电所通常设在辅助停车点、轨道道岔附近及沿线，通过变压器将 20kV 电压降压后，向轨旁开关站、无线通信基站和道岔提供低压三相 400V 交流辅助电源。在辅助停车点附近，还要给动力轨提供经三相低压交流整流后的 400V 直流电源。

如图 2.7-54 所示，一个轨旁变电所通常给多个开关站供电。为了提高可靠性，轨旁辅助电源的 20kV 有来自相连接牵引段的两路进线，用双环网结构，当一路出现故障时，不会影响开关站的工作。上海线共有 7 个轨旁变电所。

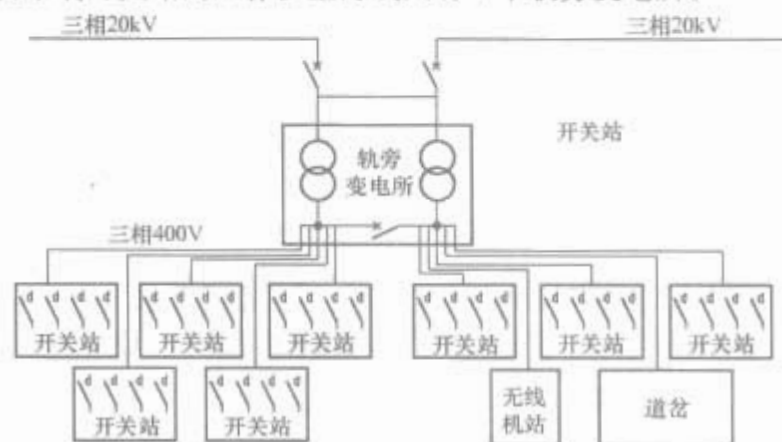


图 2.7-54 轨旁变电所供电系统

5.7.4 长定子电机段

磁浮交通列车牵引技术要求采用长定子直线电机作为牵引动力。有关长定子同步直线电机的结构及牵引制动原理在上面“牵引原理”中已经叙述过了。

采用长定子直线电机牵引可以简化车辆结构，避免高速受流，但是如果全线长定子一起供电，线路压降及有功损耗将很大。为了降低损耗，提高电机效率和功率因数，长定子直线电机采用分段供电的方式，即沿线的直线电机的定子被分成很多区段，只有磁浮列车所在的那一段的定子绕组是通电的。

磁浮交通长定子铺在轨道的两侧，相当于两个电机，牵引时，将左、右两侧的定子交叉分段。这样的结构可以减少换步时牵引力的损失，同时两侧的电机也是冗余的。

每一段长定子长度的确定需要综合考虑列车的运行速度、加速能力要求，绕组阻抗压降及轨旁设备的配置，同时还要考虑线路的坡度等外部条件。上海线供电定子段平均长度为 1200m。

5.7.4.1 定子段换步方式

定子段是指长定子的馈电点和星形接地点之间的部分。

定子段换步方法也称为定子段换流方法，是指磁浮列车在经过相邻定子段时，馈电电流从一个定子段切换到另一定子段的方法。换步方法包括短路法、蛙跳法、两步法和三步法，其中后两种方法常用。不同的换步方法要求不同数量的牵引变流设备，馈电电缆连接形式也不一样，在换步过程中，对列车牵引力的影响也不相同。

(1) 两步法。两步法同时也称为错步法。两步法要求每个牵引功率模块有两个主变流器单元，馈电电缆也有两组，每组给固定一侧轨道的定子段供电，如图 2.7-55 所示。当采用两步法时，在定子段切换过程中，因为只有两个主变流器，首先是使车辆正要离开的定子段的电流关断并下降到零，仅让另一侧的电机在起牵引作用，随后列车进入的同一侧定子段电流逐渐上升到指令值。因此，在换流期间，电机的总电流及牵引力会减少一半，换步完成后才恢复至原来值。

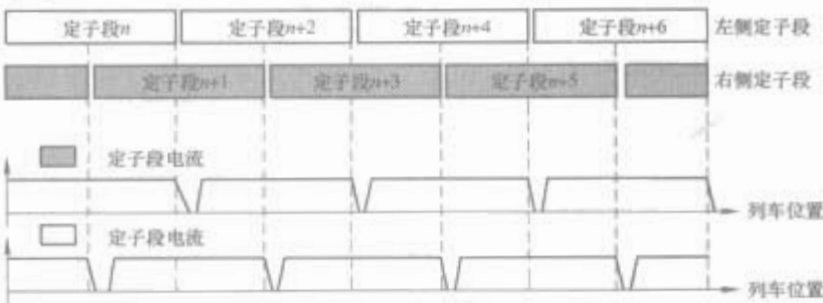


图 2.7-55 两步法换步原理图

(2) 三步法。同两步法相比，三步法要求每个牵引功率模块增加一个主变流器单元，相应地，馈电电缆组也增加为 3 组，3 组电缆轮流给轨道两侧的定子段供电，如图 2.7-56 所示。三步法在换步过程中，换步侧的两个定子段分别由两组不同的主变流器和馈电电缆供电，一侧电流逐渐减小，另一侧逐渐增大，这样电机的电流和牵引力不变，保证了牵引系统的加速能力和列车乘客的舒适感。在需要高速度或大加速度的地段，采用三步法。

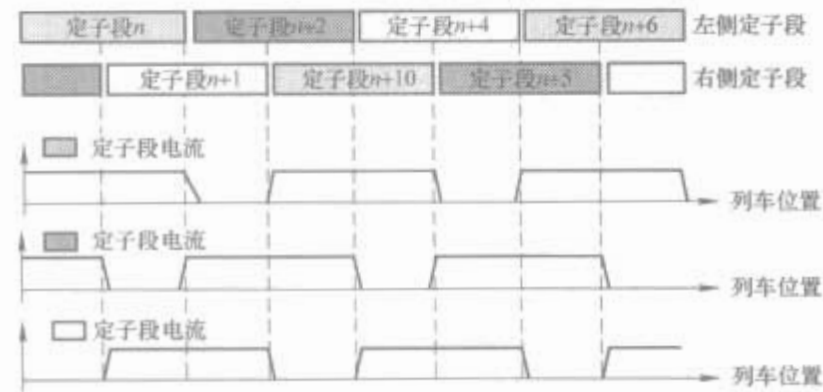


图 2.7-56 三步法换步原理图

上海磁浮线的正线采用三步法，浦东机场站内和维修基地采用两步法。

5.7.4.2 定子段供电方式

定子段的供电可以从位于牵引供电区间一端牵引功率模块向定子段供电，也可以从牵引供电区间的两端同时给定子段供电，形成了两种定子段供电方式。

(1) 单端供电方式。由一个牵引供电区间一端的牵引变电所中一个牵引供电模块向轨旁馈电线路的供电方式。

(2) 双端供电方式。从一个牵引供电区间两端的各 1 个牵引变电所中各 1 个牵引供电模块向轨旁馈电线路的并联供电方式。

单端供电通常用于线路的末端，中间段多采用双端供电，此时两侧的供电系统可以相互冗余。

上海线的牵引区间 2、区间 4 和区间 5 采用单端供电，

区间 1 和区间 3 采用双端供电，如图 2.7-47 所示。

6 线路工程

磁浮铁路线路既是磁力耦合体的静止侧，又是列车牵引电机重要组成部分（同步电机的定子或异步电机的次级感应板）的载体，所以它与轮轨铁路线路有根本的不同。加上对磁浮铁路速度目标值、安全性、对环境的影响和造价等因素的考虑，不同磁浮方式的磁浮线路有其不同的特点。本节重点介绍电磁吸力型高速和中低速磁浮铁路线路及电动斥力型高速磁浮铁路线路的特点。

6.1 EMS 型高速磁浮铁路线路的主要特点

目前，成功的电磁吸力型高速磁浮铁路有德国埃姆斯兰磁浮试验线（简称 TR 试验线，见图 2.7-57）和在德国技术转让基础上、经优化和创新建成的上海磁浮列车示范运营线（简称上海示范线）。

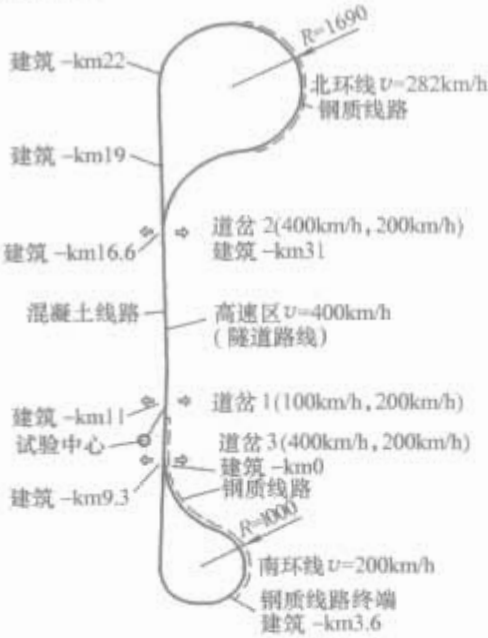


图 2.7-57 埃姆斯兰快速列车试验设施线路里程和对应的速度

与传统铁路一样，线路是由直线及平、竖曲线组成的空间曲线，也可以铺设在桥梁、路基上或隧道中。首先，由于电磁吸力型高速磁浮铁路是采用车载常导电磁体与铺设在线路上的同步电机长定子铁磁体相互吸引的悬浮方式，它的线路必须由线路中心线（横断面上两滑行轨上表面中点的纵向连线）比车辆悬浮架最下端高出近一米的轨道梁组成，如图 2.7-58 所示。其次，由于车梁组合的重心低，使得受安全条件控制的线路实设超高坡可比常规铁路的大，行车舒适度高，使曲线上欠超高坡的允许值也可比常规的铁路取得大，因此，在同一设计车速的情况下，弯道半径的取值可以比常规铁路的小。第三，由于没有轮轨黏着的限制，特别是对长定子供电段的长度可较自由地选取，使列车在必要处能取得很大的牵引（制动）力，以克服列车加速阻力和坡道附加阻力。所以，磁浮列车起动加速快，线路的最大纵坡可用到 10%，这是常规铁路、甚至公路都远远做不到的。

6.2 EMS 型高速磁浮铁路线路上部结构

6.2.1 轨道结构的特点及精度要求

6.2.1.1 特点

磁浮铁路轨道结构的特点是将轨道设备安装在轨道梁上。轨道设备的主要部分在轨道功能区，轨道功能区位于轨道结构顶部的两侧，如图 2.7-59 所示。轨道设备还有定位

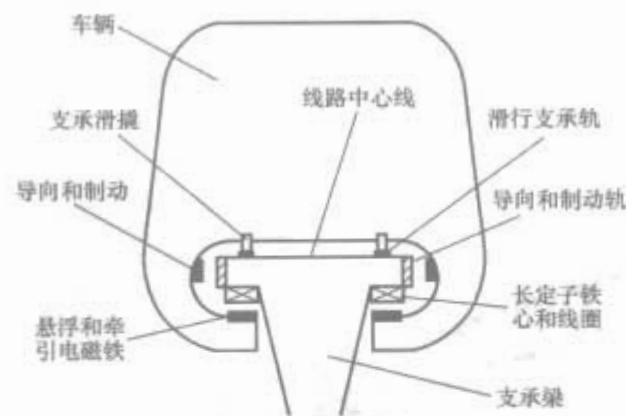


图 2.7-58 德国 TR 高速磁浮铁路车线结构简图

标志板和供电轨。轨道功能区由功能区钢结构和定子组成，有 3 个工作面（线路功能面），即顶板滑行面、磁性导向板面和定子铁心底面（如图 2.7-60 所示），它们与磁浮列车的支承、导向和牵引直接相关。

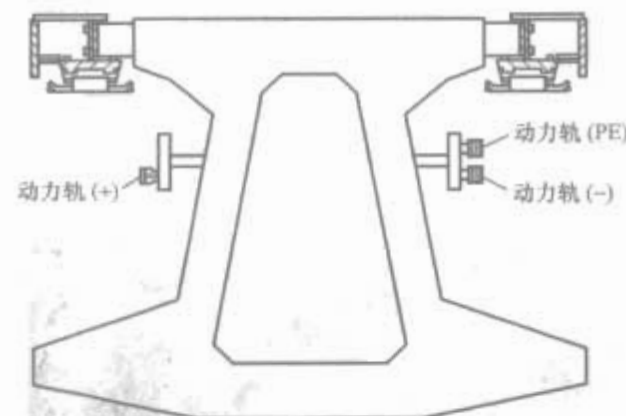


图 2.7-59 磁浮铁路轨道功能区及动力轨

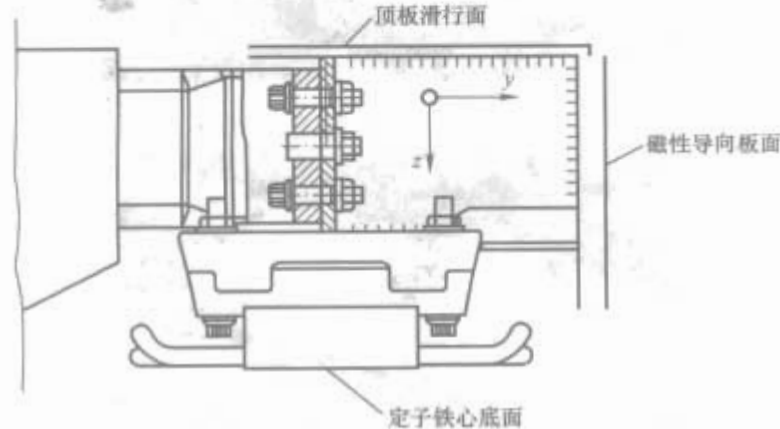


图 2.7-60 轨道功能区

磁浮列车运行时，车上的悬浮电磁铁和导向电磁铁与线路功能面定子铁心底面和磁性导向板面之间的平均距离保持在 10mm 左右，为保证列车高速运行时的安全性和舒适性，磁浮铁路系统对轨道提出了较高的设计、制造要求。

6.2.1.2 精度要求

(1) 对轨道功能面制造安装的精度要求基本上都在 1mm 以内。这种精度要求直接影响轨道结构的设计制造，如当轨道梁采用预应力混凝土梁时，混凝土收缩、徐变等引起轨道梁跨中竖向变形须控制在 1mm 以内。

功能面的几何公差主要有两个方面：一是可直接测量的公差，如位置偏差、相互之间的错位、相互之间的间隙、轨道宽度、轨距等；二是根据测量的数据，进行一定地加工计算得出的公差，如长波误差、短波误差、坡度变化指标等。

1) 偏差和错位的允许值见表 2.7-4，表中 X、Y、Z 方向分别表示线路的纵（切）向、横（法）向、竖向。

表 2.7-4 位置偏差和错位的允许值 mm

项目	定子铁心底面			磁性导向板面			滑行轨面		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
允许位置偏差	2	2		+1.5/ -5.0		10		16	
允许错位	梁跨内		0.4		0.4				0.2
	梁端		0.6		1.0				0.6
轨道宽度公差					1.0				

2) 间隙的允许值。同一梁跨内功能件之间的允许间隙为 5.5~12.5mm，相邻梁跨之间功能件间隙为 55~70mm；同一梁跨内相邻功能件之间，定子铁心间隙为 2.5~5.0mm，相邻梁跨之间定子间隙在 90~100mm 之间。

3) 坡度变化指标（NGK）的定义是每米长的功能面相对于相邻 1m 长功能面的倾斜度的偏差值，用以控制各功能面的平顺变化。这是一项非常重要的指标，以定子面的要求最高，其最大绝对值为 1.5mm/m；滑行轨面的要求最低，最大允许值为 3.0mm/m。

4) 长波误差和短波误差。前者是拟合位置与理论位置比较的差值，后者是拟合位置与实测位置比较的差值。这两个误差保证实测值、拟合曲线值、理论位置之间的差值在一定的范围之内。

(2) 轨道梁力学性能方面的要求主要包括两个方面：

1) 结构刚度方面。系统要求轨道梁结构在列车荷载（竖向荷载 P_z 、横向荷载 P_y ）、外界环境影响（如风力、温度变化等）作用时，其变形和挠度控制在很小的范围内。详见表 2.7-5 [表中 L 为跨度（支点距离），m]。

表 2.7-5 轨道梁变形要求

项目	坚（Z）向变形 f_m		横（Y）向变形 f_{ym}	
	$P_z=25.6\text{kN/m}$	由温度引起的	$P_y=3.9\text{kN/m}$	由温度引起的
单跨	$\leq L/4000$	$t_u > t_d$ 时 $ -L/6500 $ $t_d > t_u$ 时 $ L/5400 $	$\leq L/15000 $	$\leq L/5800 $
双跨	$\leq L/4800$	$t_u > t_d$ 时 $ -L/8000 $ $t_d > t_u$ 时 $ L/6500 $	$ L/18000 $	$\leq L/6960 $
多跨	边跨符合双跨梁要求，中跨符合单跨梁要求			

梁端切向扭转角 $[\theta] = 0.0008\text{rad}$ 。

由混凝土收缩徐变等引起的长期变形，其值应处于长波偏离允许公差范围内

注 箱形的轨道梁的竖向温度变形因箱梁上部温度与下部温度有差别而有所不同。表中“ $t_u > t_d$ ”表示梁上部的温度高于梁下部的温度，此时的竖向变形与 $t_d > t_u$ 时是不同的。

2) 结构动力性能方面。为减小列车运行时轨道结构的动力反应（振动），避免车桥谐振，要求轨道梁的竖向固有频率（自振频率） n_0 必须大于 1.1 倍的列车运行速度与轨道梁跨度之比，即

$$n_0 > 1.1 \frac{v}{L} \quad (\text{Hz}) \quad (2.7-22)$$

式中， v 为列车速度，m/s； L 为简支梁跨度，m。

(3) 轨道梁的定位精度。除了满足上述的梁间功能面相对精度外，还要满足下列相对于空间曲线和线路控制桩位理论位置的安装公差要求：

1) x 方向： $\pm 1\text{mm}$ （参考位置为固定支座轴线）。

2) y 方向: $\pm 1\text{mm}$ (参考位置为距离固定支座轴线 100mm 处轨道梁两侧面磁性导向板中心)。

3) z 方向: $\pm 1\text{mm}$ (参考位置为距离固定支座轴线 100mm 处定子铁心底面中心)。

6.2.2 轨道设备

6.2.2.1 功能区内的轨道设备

(1) 3 个工作面的组成及作用:

1) 滑行轨面是功能件顶面滑行板 (为 S335N 钢板, 厚为 15mm , 宽为 360mm) 的上表面, 在列车停止状态时支承列车; 在列车运行中, 若悬浮架的两个悬浮控制电路出现故障或列车安全制动, 磁浮列车通过滑橇降落在滑行板上时, 滑行板承受机械支承力和摩擦阻力。

2) 磁性导向板面也称侧面导向板面, 是功能件侧面导向板 (为软磁结构钢, 厚为 30mm , 高为 305mm) 的侧表面, 当列车正常运行时, 它与列车导向系统一起完成磁浮列车的导向功能。同时, 也作为涡流制动的反应轨, 并在悬浮架上两个导向控制电路失效或列车完全制动时, 作为导向磁铁靴或制动磁铁靴的接触导向板, 起机械导向作用或摩擦制动作用。

3) 定子铁心底面也称定子面, 是安装在功能件定子固定件 (在其下缘有根据定子类型加工的横槽及螺栓孔的型钢) 上的长定子铁心的下表面, 是直线同步电机的组成部分。当长定子绕组中通有三相交流电时, 产生移动电磁场带动悬浮着的车辆同步运行。

(2) 功能区钢结构 (简称功能件) 是借助竖向及水平肋板把顶面滑行板、侧面导向板及定子固定件连接在一起, 且用腹板加强的钢结构, 形式如图 2.7-61 所示。一般直线上功能件的长度为 3.096m , 不过由于下述诸原因, 导致上海示范线轨道梁功能件共有 36 种类型。

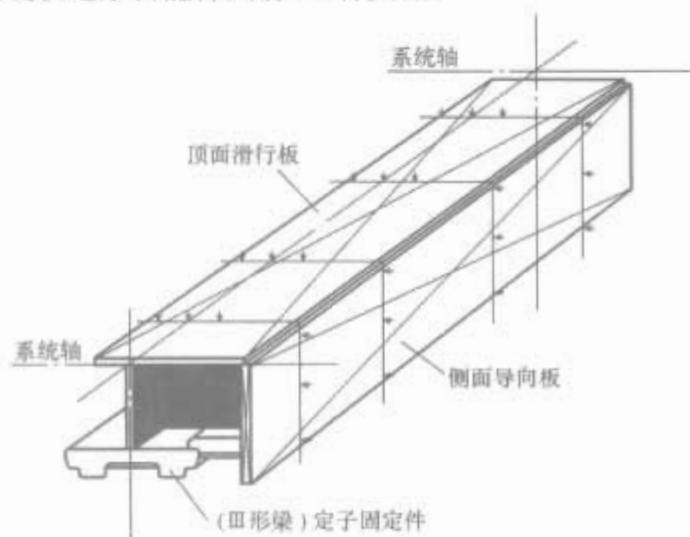


图 2.7-61 功能区钢结构 (功能件)

1) 双线铁路转弯时, 在曲线外侧的线路半径大、曲线长、内侧线路的半径小、曲线短, 为拟合曲线, 需要用不同长度的梁和靠调整部分功能件的长度加以配合。

2) 线路转弯处轨道梁内、外侧功能件总长度不同。平曲线半径小于限值时功能件导向板需采用曲线布置, 轨道梁内外侧功能件侧面导向板弯曲方向相反。

3) 轨道梁中部与端部温度变形等的差别要求不同的功能件。

4) 定子类型不同而导致定子固定件上的横槽及螺栓孔等位置不同。

(3) 定子是由硅钢片叠成的铁心与铁心槽内的三相线圈构成。磁浮铁路采用的直线电机, 其工作原理与旋转式电机相似。由于在整条线路上都敷设定子, 其长度比旋转电机

的定子长许多, 因此这种磁浮铁路又称长定子磁浮铁路。三相线圈绕组是在工厂制造, 再由专用铺设车敷设到已经在铁路现场就位的长定子槽中。图 2.7-62 展示了磁浮铁路的长定子。

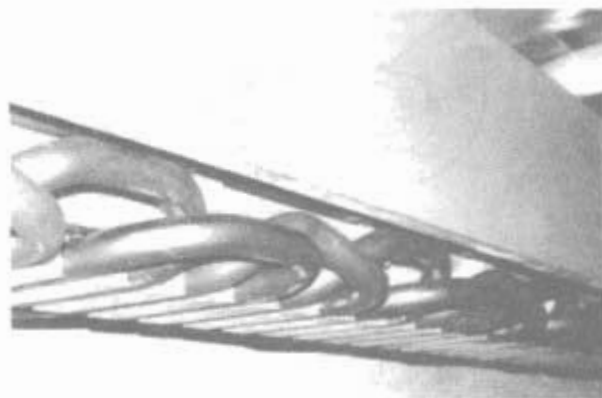


图 2.7-62 磁浮列车的长定子

1) 定子铁心由 M800-50A 硅钢片叠合而成。其底部预留了用于安放定子线圈的齿槽、顶部有 3 个用于将其固定在功能件上的横梁 (燕尾销), 每个燕尾销两端有螺栓孔, 如图 2.7-63 所示。安装时, 先将燕尾销插入功能件定子固定件的燕尾槽内, 再以高强螺栓穿过燕尾销的螺孔, 将铁心固定在功能件定子固定件上, 如图 2.7-64 所示。



图 2.7-63 堆放着的定子铁心

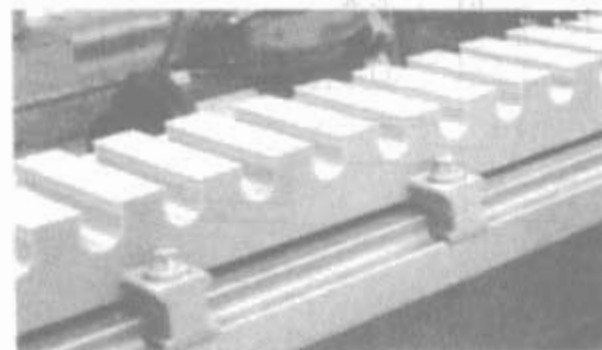


图 2.7-64 安装在功能件上的定子铁心

2) 铁心被制成一定长度的直线段。分析表明, 用太短的铁心段来拟合线路曲线不经济, 太长了, 在小半径曲线地段又会造成偏离理论曲线的量超过允许值。理想的定子分段长度应当是线圈周期长度的整数倍。相当于移动磁场一波长的一个线圈周期由 6 个齿槽周期组成, 每个齿槽周期长 86mm , 故一个线圈周期的基本长度是 516mm , 铁心的基本长度取线圈周期长的两倍, 即 1032mm 。考虑定子铁心间安装缝隙等要求, 铁心长度会适当缩短。上海示范线采用的定子铁心有 M 型、EE 型和 EA 型 3 种, 他们的长度尺寸如图 2.7-65 所示。

3) 定子铁心在功能件上有两种布置方式。径向布置是每节铁心均沿线路理论轴线的切线方向布置, 同一个功能件上的定子各有其独立的横坡、纵坡和方位角; 直线布置是定子沿功能件腹板轴线直线布置, 同一个功能件上的定子有相同的横坡、纵坡和方位角, 且定子底面保持在同一平面内。

这两种布置方式各有优缺点, 径向布置对曲线线路的

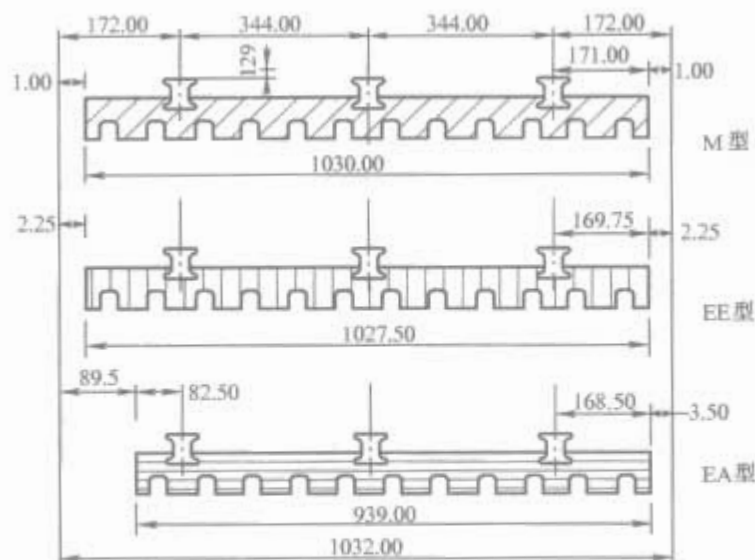


图 2.7-65 3 种定子的长度

拟合精度高，对线路主要技术标准（如最小曲线半径 R_{\min} 等）基本上没有约束，但加工难度大；直线布置加工简单，但对曲线线路的拟合精度较差，或需要对线路主要技术标准加以约束，如必须用较大的 R_{\min} 等。因此，在设计过程中，要将这两种布置方式结合使用，以保证在实际线路对理论中线的偏差不超限的前提下，尽可能地降低机加工难

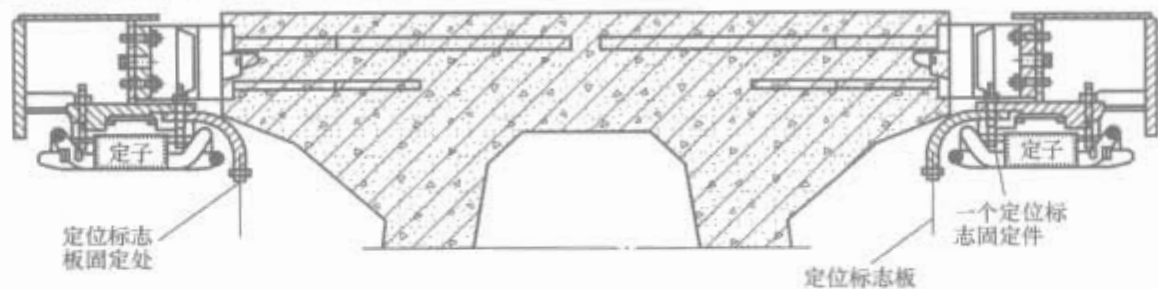


图 2.7-66 定位标志位置

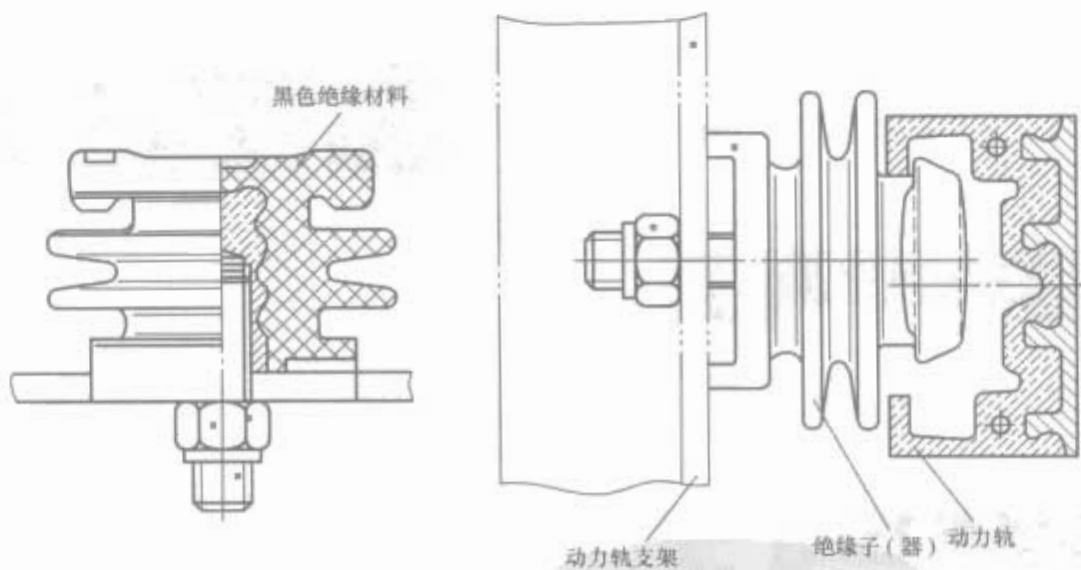


图 2.7-67 绝缘子构造

6.2.3 轨道梁

磁浮线路系统对轨道梁的特殊要求有：车辆包在线路外面的防脱（轨）系统，要求轨道梁必须有一定高度；车辆对线路功能区工作面位置准确性提出了很高的要求，需要有一种安装公差最小的施工方法和结构，它的最小永久变形几乎为零，且在建筑地基产生不可避免的沉降时能很快得到调整等。目前，满足了这些技术要求的典型结构有两类，即德国 TVE 二期工程中的钢质轨道梁和上海示范线上完全国产化的预应力钢筋混凝土复合梁等。

6.2.3.1 德国 TVE 二期工程中的钢质轨道梁

1985 年开始，有 10km 长的 TVE 二期工程（包括南环线）中共设 5314m 钢质轨道梁，其中绝大部分为单跨长度 25m 的全焊简支梁。这批梁比一期工程改善了功能（消除了

度和工作量。

6.2.2.2 其他轨道设备

（1）定位标志板是长方形薄板，一端切角，其上标有按线路绝对位置编排的二进制编码。当列车经过时，车载定位传感器（INCVLO 测量装置）读入板上的编码，可间断地确定列车所在的绝对位置（与齿槽计数测速定位法结合在一起，可长距离、连续可靠且精密地检测出列车的位置）。定位标志在线路上每隔约 500m 设置一套，具体位置由列车运行控制系统确定。定位标志也按冗余的要求设置，即在设置定位标志的轨道梁两侧各设 3 个定位标志板。

固定定位标志板的固定件安装在功能件定子固定件下翼板下。为此，在有关下翼板上必须加工有定位标志固定件安装槽。定位标志板在轨道梁上安装的具体位置见图 2.7-66。

（2）供电轨设置在磁浮线路车站、辅助停车区及维修基地等处，以便磁浮列车通过受电靴给列车悬浮机构、空调、照明和车载蓄电池充电。供电轨由铝合金和不锈钢材料复合加工而成，标准长度是 8242mm，自重为 91kg。供电轨分正、负和 PE（接地）3 极，通过支架固定在轨道梁腹板上。为避免受电靴集中磨损，支架位置可略作调整，供电轨与支架间还有绝缘子，如图 2.7-67 所示。

磁铁啮啞声)、增大梁高近 19.5%，也降低了轨道梁的加工和安装费用，并使用由圆管下翼缘、盖板（含滑动平面）与两侧倾斜的腹板构成的三角形横截面（见图 2.7-68）。三角形梁本身稳定，无需任何横撑来保持它的截面形状和梁的扭转刚度，圆管下翼缘不受选线的限制；梁的制造过程，如根据线路空间几何曲线加上对空间曲面薄板（顶板）平面展开时变化的数据下料、全自动焊接、确定每节定子铁心在梁上的位置和安装等，多采用数控系统（如六坐标铣镗床等）。因此尽管几何要求不同，致使 200 多跨梁很少有完全相同的，但也只在很少的情况下才需要再加工。

6.2.3.2 上海示范线研究开发的轨道梁

技术上能完全满足系统要求的 TVE 钢梁，加工制造必须的六坐标铣镗床价格昂贵又难以购置，而且全线使用钢结

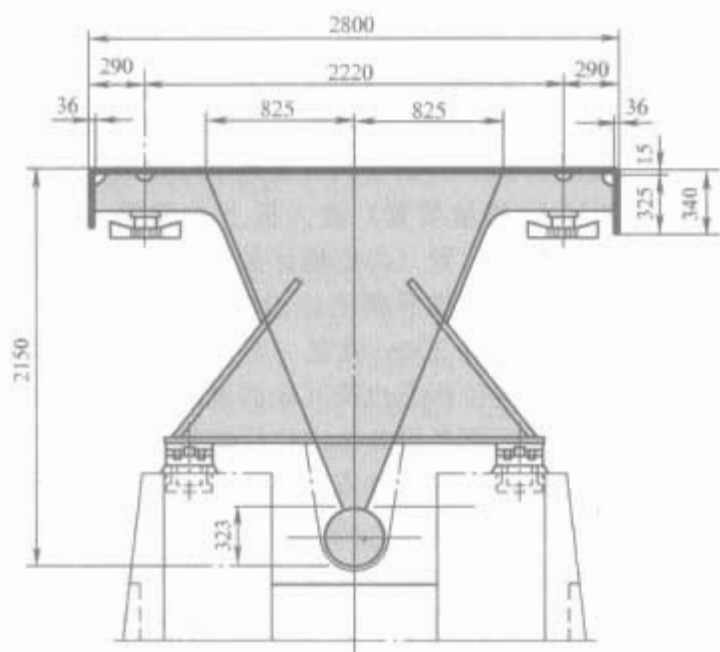


图 2.7-68 德国 TVE 二期工程钢制轨道梁的横截面

构也不符合我国国情。上海示范线采用了预应力钢筋混凝土复合梁等多种结构。

(1) 预应力钢筋混凝土复合梁是由功能区钢结构（简称功能件）与整体性强、抗扭刚度大的箱形截面预应力混凝土梁通过连接件复合成的轨道梁。预应力混凝土梁设计、制造时均按零挠度控制，以确保混凝土收缩、徐变后梁体仍能保持直线状态；然后用国产的五坐标双铣镗床对连接件的连接面及螺栓孔、定位销孔进行整梁机加工；最后装上功能件，拟合成线路所需的空

间曲面。为减少轨道梁长度种类及简化功能件、定子铁心布置，磁浮线路内、外侧线上的轨道梁采用等跨布置，标准跨径（空间线路轴线长度）为 12.384m、24.768m（图 2.7-69）。此外，还按功能件长度模数（3.096m）确定了非标跨径，如 18.576m、21.672m。它们或是为使弯道上的双线墩帽近似排列在线路的法线方向上而被用于双线线路的内侧线上；或是在线路遇到横向道路、立交和河流时用以调整孔跨位置，以满足通车和通航的要求。

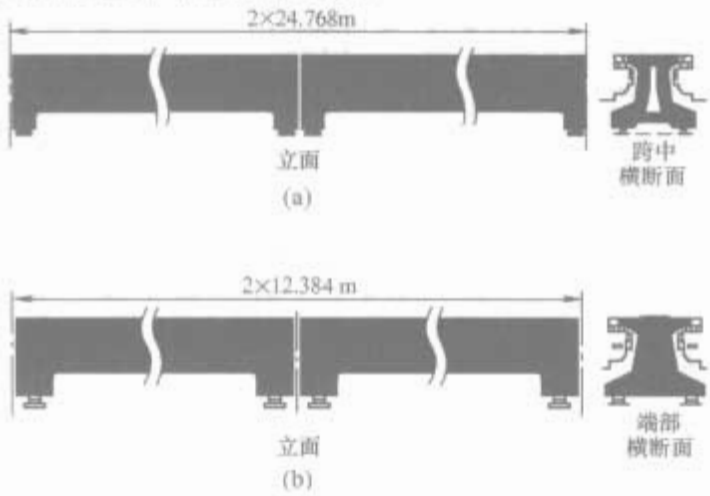


图 2.7-69 两种标准跨径预应力钢筋混凝土复合梁

在德国技术转让的基础上优化和创新的预应力钢筋混凝土复合梁作为轨道梁有如下特点：

- 1) 主体结构预应力混凝土梁采用了高强度、低收缩徐变混凝土；其预应力按“轴心受压”技术，在先张法的基础上，再作两次后张预应力，将混凝土梁的收缩、徐变变形控制在系统允许的范围内，并预留了设置梁体外预应力的可能，使轨道梁线型在线路运营后仍可以根据需要加以调整。
- 2) 复合梁在制造安装阶段均为简支梁，精确定位后利用简支梁连续构造转变为双跨连续梁，如图 2.7-70 所示。简支变连续技术既方便了轨道梁的制造、运输、安装，又使

轨道梁受力及变形更合理。

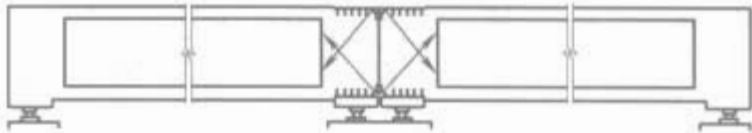


图 2.7-70 “先简支后连续”的复合轨道梁

3) 在线路上，预应力混凝土梁采用直线布置，断面根据横坡角整体倾斜，支座处设水平垫块，如图 2.7-71 所示支座水平设置。

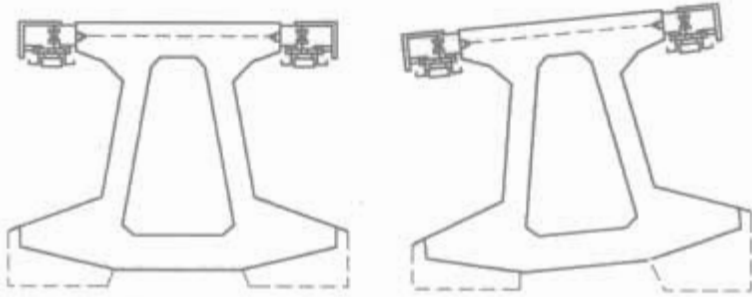


图 2.7-71 有无横坡的轨道梁设置

4) 功能件系统长度为 3.096m，采用直线布置，连接件按空间位置预埋，不设预拱。

5) 采用的专用数控设备为五坐标数控铣镗床，是复合梁连接件加工、保证复合梁功能件安装精度的重要设备。机床走行机构的行程长 31m，采用双机床加工同一构件，因此机床必须跟随轨道梁的实际空间位置调整自己的加工轨迹。

(2) 钢复合梁是由功能件和钢梁通过连接件复合而成的轨道梁。钢复合梁为单箱单室断面、 $2 \times 24.768\text{m}$ 的双跨连续直线梁，如图 2.7-72 所示。其功能件形式与预应力钢筋混凝土复合梁的相同，材料与钢梁相同（S355N），并设计为一整体。为了试验研究，在上海示范线中部、车速为 430km/h 的路段上设置了一根。

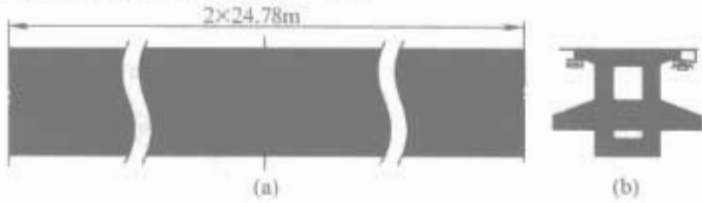


图 2.7-72 钢复合梁
(a) 立面；(b) 横断面

(3) 桥上轨道梁为双层组合式结构，由上层轨道梁、下层桥梁结构及上下层连接机构组成。上海示范线在线路跨越浦东运河、川杨河时采用了桥上轨道梁结构。

1) 上层轨道梁采用 6.192m 长的钢筋混凝土板梁。板梁为复合式结构，即轨道功能件与钢筋混凝土板分开加工制作，再用连接件连接，功能件及连接件与预应力钢筋混凝土复合梁的相同。

2) 桥梁结构根据所需跨径、地形、地质及施工条件确定，可用梁式、拱式等形式。浦东运河桥及川杨河桥采用三跨连续钢梁，跨径布置分别是 $26.832\text{m} + 45.407\text{m} + 26.832\text{m}$ 及 $22\text{m} + 34\text{m} + 22\text{m}$ 。断面采用双线独立式单箱单室箱梁，在支点及跨中设置横系梁。箱梁腹板外侧设人行道及电缆架。

3) 连接机构是上下层结构间的钢质传力结构，在每块板梁下设 4 个。该结构采用工字形截面，顶板焊接抗剪拉焊钉，上层轨道梁板内预留后浇孔，板梁精确定位后现浇混凝土连接；底板与下层钢梁顶板采用高强螺栓连接，中间设调位钢板，如图 2.7-73 所示。

(4) 维修基地钢梁为磁浮列车提供检修平台。维修基地钢梁除构造上应满足列车检修时所需传感器定位的要求外，

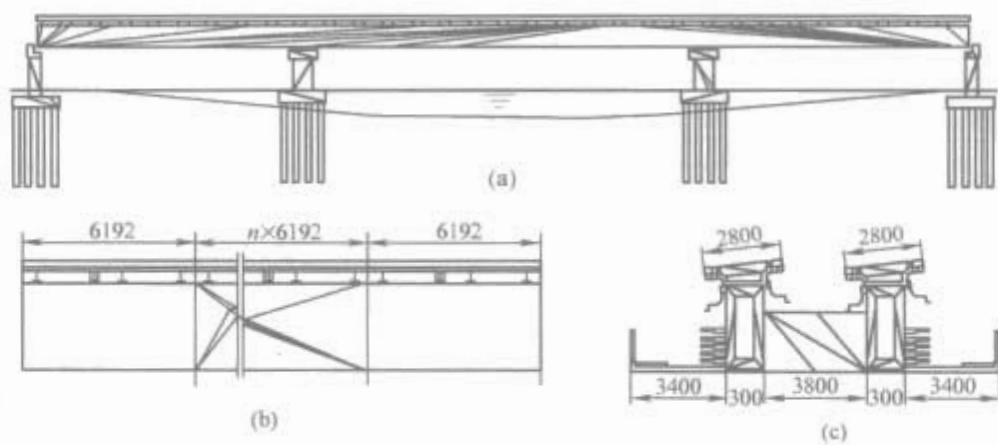


图 2.7-73 三跨连续钢梁结构布置
(a) 布置图；(b) 钢梁立面；(c) 钢梁横断面

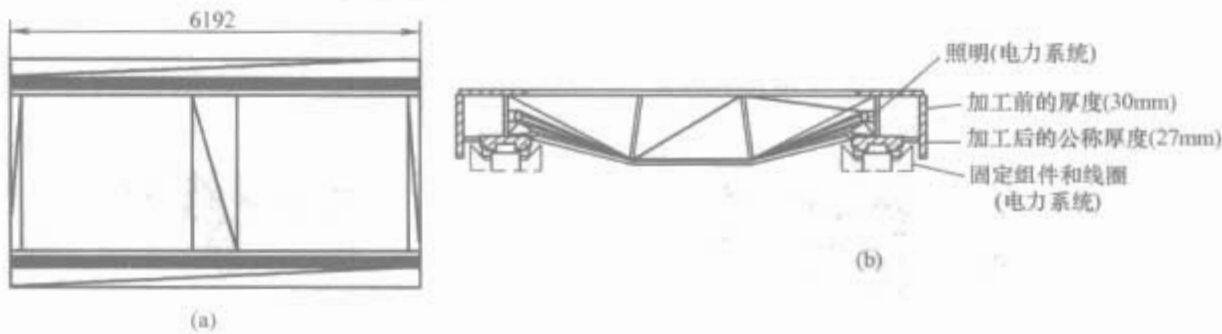


图 2.7-74 维修基地钢梁结构布置
(a) 平面；(b) 跨中断面

还必须满足与主线轨道梁相同的各项技术要求，如动力性能、变形要求及操作限界等（见图 2.7-74）。

上海示范线维修钢梁采用整体框架式结构，共有 3 种基本类型，即 3.096m 可移动钢梁、3.096m 和 6.192m 固定式钢梁。

可移动钢梁由功能件、铰链及移动机构等组成。它通过铰链、定位及滑轮固定或移动于前后固定式钢梁上。

固定式钢梁由功能件及横梁组成，用高强度螺栓固定在钢支承立柱上。

功能件顶面滑行板、侧面导向板、定子铁心固定部位及铰链、定位销等必须进行机加工。

(5) 多种三向无级可调支座在上海示范线上的运用，成功地解决了在软土地基上的线路结构、因后期沉降可能使轨道梁发生超过定位精度的位移这一问题。

6.2.4 转线设备

磁浮线路的转线设备有两类：道岔和移车台。

6.2.4.1 道岔

电磁吸力型磁浮线路道岔实际是一根可弹性弯曲的多跨连续钢梁。

(1) 与轮轨铁路道岔相同的是，道岔上都不设超高，道岔范围内都不允许设置竖曲线，列车从正线通过时车速都不

受限制，侧向过岔速度相同时道岔长度相差不大；所不同的是，轮轨铁路道岔侧向只设圆导曲线，转辙时道岔基本轨不动，只动尖轨（心轨），尖轨动程为 152mm。磁浮道岔的侧向曲线两端设有缓和曲线，侧向定位时道岔平面呈直线—回旋曲线—圆曲线—回旋曲线—直线的线型组合，由于车辆外包轨道导致磁浮道岔需要整条轨道梁一起移动，最大移动量为 3.6m。

(2) 为满足舒适度的要求，除渡线外，在侧向通过磁浮道岔后的线路上应设置一段运行时间不小于 2s 的直线段。道岔允许的最大牵引和制动加速度为 1.5m/s^2 ，最大自由侧向加速度为 2.0m/s^2 。

(3) 道岔分类。

1) 按允许的侧向过岔速度，道岔可分为高速道岔和低速道岔两大类。前者过岔速度为 198km/h ，后者为 98km/h ，详见图 2.7-75 和图 2.7-76。为适应两条长大干线之间高速换线的需要，德国蒂森克虏伯公司还推出一种侧向过岔速度达 400km/h 的超高速道岔。

2) 根据连接线路的数量，道岔可分为双开道岔和三开道岔。上海示范线共设置 8 组电机驱动的低速道岔，其中一组是三开道岔，用于维修基地，如图 2.7-77 所示。道岔梁下共设置 6 个墩柱，其中 0 号墩柱上设置道岔基座，1~5

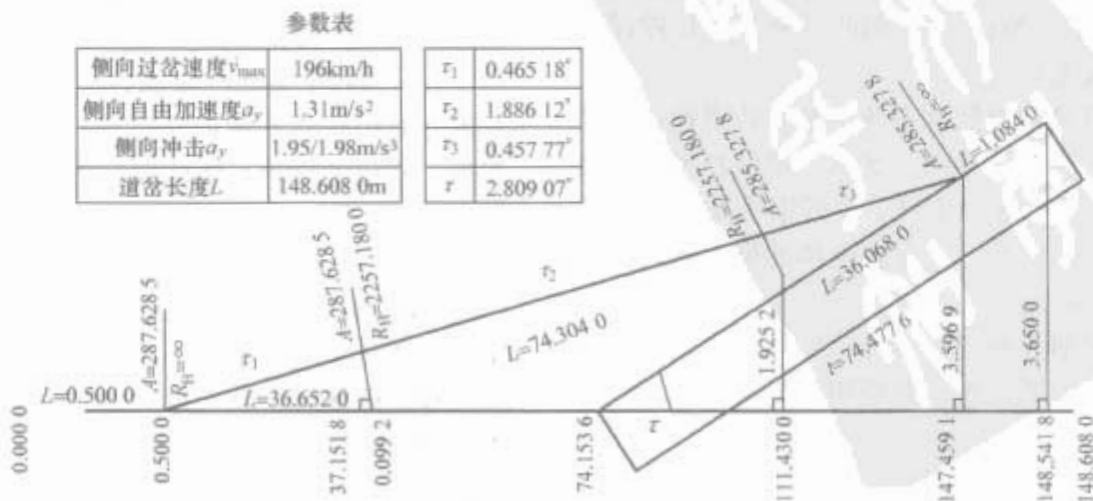


图 2.7-75 高速道岔要素

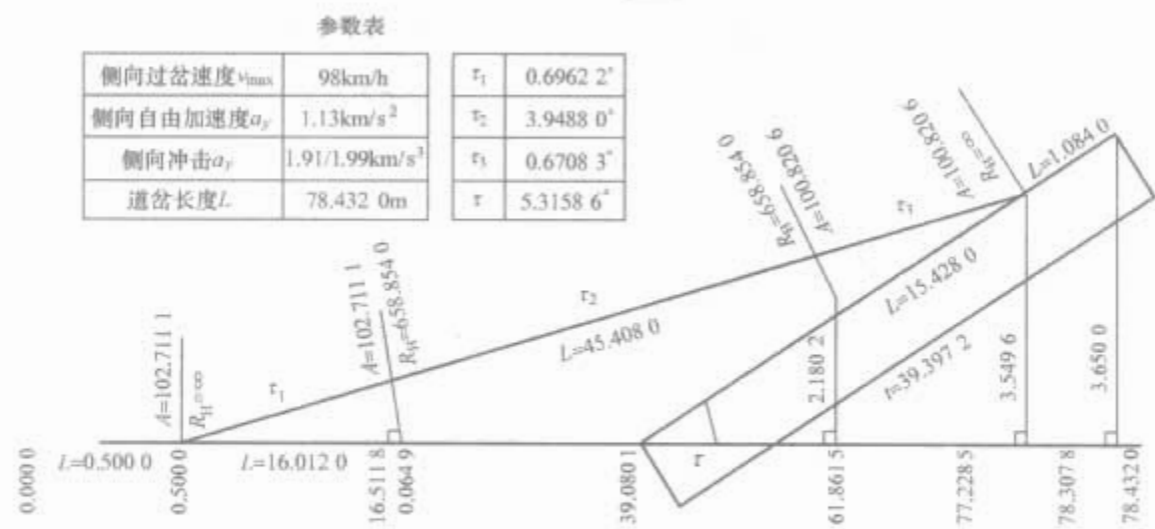


图 2.7-76 低速道岔要素

号墩柱上设置了固定在墩柱上的道岔移动横梁及定位和锁定装置，以确保道岔梁能弯曲到设计的位置上。

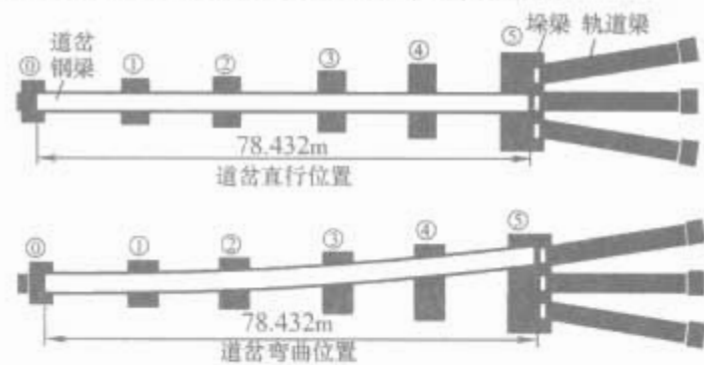


图 2.7-77 低速三开道岔原理

6.2.4.2 移车台

移车台为整个轨道中的一小段，借助齿轮机构的驱动，可以将停在其上的车辆和轨道梁一起平移到指定轨线位置，以便车辆移上新线。移车台长度比车略长，它占地少但转线时间较长，如从一线路平移到相距 8m 的另一线需要约 120s 的时间。移车台主要用于维修基地或列车停车场。

6.2.5 线路施工

线路施工包括下部结构施工，轨道梁制作、运输、架设及精确定位。轨道梁精确定位就是要通过操纵三向可调千斤顶（一种三向无级可调支座）、配合控制测量，达到调控定子铁心空间位置，使之满足上述精度要求的目的。

6.3 EMS 型中低速磁浮线路构造的特点

日本从 1972 年起开始了主要用作城市轨道交通、速度在 100km/h 左右的 HSST (high surface transport) 系统 (EMS 型中低速磁浮交通) 的研发。由于该系统采用短定子直线感应电机牵引，电机定子装在车上（牵引功率转换和控制也在车上实现），因此轨道上无电机线圈。图 2.7-2 (b) 所示是该系统于 1995 年开始运行试验的 HSST100L 磁浮列车的走行部与轨道的关系图。

由图 2.7-2 (b) 可见，虽然该系统也是将轨道设备安装在轨道梁上，但其用于悬浮、导向、支承、牵引和测速定位等轨道设备都不同于前述 TR 型系统，F 形钢轨安装在钢质轨枕上，钢质轨枕置于梁表面，在梁腹两侧的供电轨是通过绝缘子安装在 PC 梁上的。

我国磁浮交通技术研究始于 20 世纪 80 年代初期，中低速磁浮交通系统现正处于系统集成和应用研究阶段。

6.3.1 轨道设备

6.3.1.1 悬浮导向和支承用的导轨

HSST 系统在轨枕两端装有钢制 F 形导轨（如图 2.3-78

所示的上半部分）。它既是受力构件，又是有悬浮导向功能的功能件。

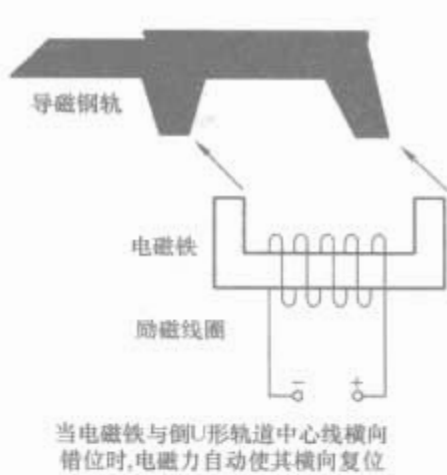


图 2.7-78 HSST 的导向原理示意图

(1) 导轨的悬浮功能是由其倒 U 形部分承担的，倒 U 形部分与车载悬浮电磁铁的正 U 形铁心相对，电磁铁通电时它成了悬浮磁路。其间的电磁吸引力将列车向上拉近轨道，而电磁铁控制系统则通过控制励磁电流调整吸引力，以确保磁铁与轨道之间的距离（间隙）维持在 8mm 左右，从而实现列车稳定悬浮。

(2) 导轨的导向功能有两种表现。首先，当列车偏离中心线时，电磁铁的正 U 形铁心偏离轨道上的倒 U 形，使两者之间的磁引力倾斜，由于悬浮电磁铁的边缘磁场效应产生了一个与电磁铁偏离方向相反的横向复位分力，使列车返回正位，如图 2.7-78 所示。所以，HSST 磁浮列车的磁导向是自动的，不像 TR 型系统那样另外需要导向电磁铁，这是主要的。其次，因上述导向力要比 TR 型系统的导向力小，所以当列车低速行驶或停在横坡较大处、或又遇到较大横向风力时，为防止因电磁导向力不足而造成悬浮架贴向倒 U 形导轨侧面，设置在车辆内侧的导向轮（或导向滑块）将沿倒 U 形导轨的侧面行走，此时导轨起到机械导向的作用。

(3) 导轨上表面（尾部直线段）作为支承面。在磁浮列车停站时用作对支承滑块（橇）或必要时的滚轮实施支承，当然，它也是导轨与轨枕固定连接的部分。

6.3.1.2 牵引与供电设备

(1) 敷装在导轨上表面（倒 U 形顶部）的铝（或铜）板（又称反应板），与磁性钢导轨组成感应电机的复合次级。当车载三相异步电机定子（又称短定子）通入三相电流后产生一个移动磁场时，就与感应板中的感生磁场一起牵引列车前进、调速或后退，故导轨结构简单，可用普通低碳钢轧制，降低线路系统成本。这是系统采用直线感应电机作牵引动力设备的优点。

最后,倒U形的外侧臂还是进站列车实行机械制动(车速低于10km/h)时钳式制动闸片的摩擦副。其时,它将为车辆实施停车制动。

(2) 供电轨安装在轨道梁两侧[见图2.7-2(b)],以便通过车载受流器为安装在车上的大功率动力设备提供1500V的直流电。由于直线电机气隙大,牵引电机的功率因数和效率都较低,因此供电设备容量选择需远大于电机输出功率;另外,这种以机械接触方式实现受流的系统,也是HSST系统只适于中低速运行的一个原因。

6.3.1.3 定位与测速设备

在钢枕中央纵向设置的交差感应回线,是利用电磁感应原理来检测列车速度和相对位置的设备。HSST系统采用它与泄漏同轴电缆一起实行对车辆的测速和定位(还可用于双向数据通信)。当然,泄漏同轴电缆也可以用位置标志板代替。

6.3.1.4 轨道设备的精度要求与加工

由于HSST系统要求在保持8mm稳定气隙的条件下运行,因此对线路几何线形的精度要求不会低于TR型系统,而线路几何线形精度的保证首先必须落实在导轨上。虽然F形导轨可以轧制得较长(如12m),但为了更好地拟合曲线、尤其是小半径曲线,有的导轨还需要被截得较短(例如,若在允许车速达50km/h的80m半径弯道上,用长2.5m的直线导轨段拟合曲线,可使拟合差略小于5mm),并且对有关工作面还得进行精密机加工。其次,对钢枕的要求也不能太低。最后,在钢枕与轨道梁之间还有可用钢或钢筋(丝)混凝土制的支座,它不仅可以对线路高程起到微调的作用,而且还可以为线路超高横坡的设置出力。但它也是一件需要注意加工制作的设备。

6.3.2 轨道梁、转线设备及支座

与TR型系统一样,HSST系统也是采用车辆外包线路的结构,当然也要用类似的转线设备。要保证导轨空间位置的正确,对轨道梁、道岔及支座等各项要求同样也是较高的。最后,他们还得满足城市轨道交通车辆的长、宽值都比TR型车辆小所形成的各种要求。

6.4 EDS型高速磁浮铁路线路的特点

电动斥力型(或称电动悬浮型)磁浮交通与TR型系统一样,也用长定子同步电机牵引。但是因靠高速运行中的车载磁场与地面(线路上)磁场的相斥作用使车辆悬浮,故线路结构也有其不同于TR型系统的特点。另外,为防止强磁辐射危及旅客安全和影响环境,需要在车站等处采取磁屏蔽措施,如旅客乘降要通过类似“登机桥”的通道,也是此类交通的特点。车载磁场有低温超导线圈中强大的超导电流形成的超导磁场和永磁材料形成的永磁场之分,二者的典型代表分别是日本的MLX01型低温超导高速磁浮交通系统和美国的永磁式磁浮列车(又称磁浮飞机——Magplane)系统。

6.4.1 轨道梁

6.4.1.1 日本MLX01系统的U形槽式轨道梁

U形槽式轨道梁是日本经过近二十年的试验研究,于1979年11月最终选定的。原因是这种结构可以使车辆得到更大的乘坐空间。与上述轨道梁一样,U形槽式轨道梁也可以直接架在墩上、桥上或隧道中。

(1) U形槽式轨道梁承担着两种行车功能:一是它要像飞机跑道一样支持列车起浮或落停;二是它要确保列车安全地高速行驶。这些功能要求规定下的轨道梁结构,如图2.7-79所示。在轨道梁的两侧壁上各安装有两层线圈,内层

(靠近线路中线的那一层)安装着用于悬浮和导向的8字形短路线圈,外层是同步直线电机的定子线圈。

当定子线圈中通入三相交流电、产生沿线移动的磁场后,与车载超导磁场相互作用,使车辆与移动磁场同步进退。此时,8字形短路线圈中因与车载磁场相对运动而感应出电流和磁场(8字形短路线圈下半环产生磁斥力、上半环产生吸力),车辆两侧的感应磁场与对应的车载超导磁场共同作用,产生了使车辆上浮和居中的力(悬浮、导向力),当车速达到约150km/h时,列车进入与线路完全无接触的悬浮状态,此时的U形槽侧壁就成了列车牵引、悬浮、导向力的载体。

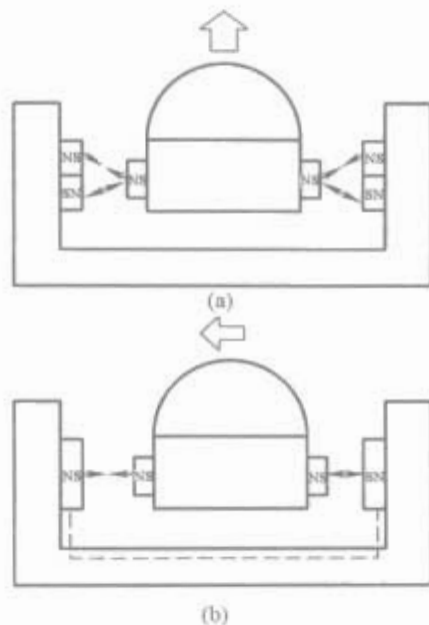


图2.7-79 U形槽式轨道梁

(a) 悬浮原理示意图;(b) 导向原理示意图

当车速低于150km/h或为零时,该悬浮、导向力就很小或为零,此时磁浮列车要依靠橡胶轮支持行车或停站,并依靠安装在转向架两侧的导向车轮执行导向功能。此时的轨道梁要完成“跑道”功能,为此在U形槽底部设了两条凸起的平台供行车或停车用。

U形槽底部中间是列车测速定位系统的地面设备——交差感应回线。该系统的另一个地面设备——LCK漏泄同轴电缆却敷设在U形槽侧壁的顶上。此外,轨道梁上还设有馈电、通信等电缆。

(2) U形槽式轨道梁为分段预制混凝土结构,每段长12.6m。为避免对悬浮导向磁场的干扰,轨道梁中采用非铁磁性钢筋(高锰钢)和预埋连接件。山梨试验线上最终多用的是U形槽整体结构,在其侧壁内侧安装有绕组嵌板,嵌板在预制厂内制造、装上定子线圈和悬浮线圈后,送到线路上安装到U形槽的侧壁。由于高速运行时磁浮列车的侧壁与8字形线圈表面的距离为100mm,车底部与U形槽底板的间距大于100mm,故有关部件的加工安装精度要求可低于常导磁浮系统,但要注意以不引起车辆垂向和侧向振动、使舒适度低于新建新干线列车为度。

6.4.1.2 永磁式磁浮列车系统圆弧形的轨道梁

虽然永磁式磁浮列车系统目前还只是在1/25试验模型、100m试验轨道试验基础上的全尺寸仿真模型,但其概念结构非常简单、很有特色。

如图2.7-80所示,其轨道梁面和车体下部断面一样,均是圆弧形。圆弧形轨道梁面的两边为铝质导轨,与列车底部两侧按一定极性排列的永久磁铁相对;中间部分为长定子直线电机的绕组,与车体底部中间的永久磁铁一起组成永磁

同步直线电机。

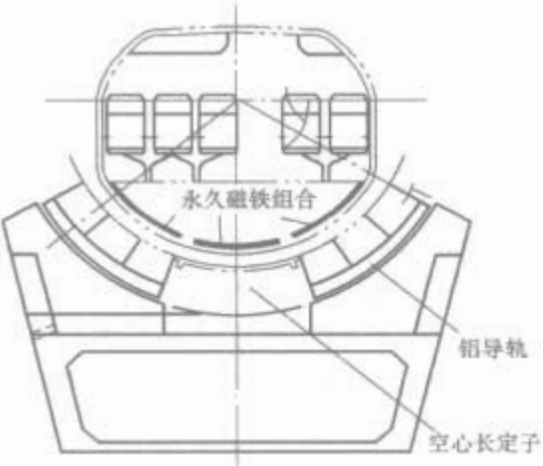


图 2.7-80 圆弧形的轨道梁面与车底

当列车行驶时，运动着的车载永磁体引起轨面两侧铝导轨内产生涡流，从而产生使车体上浮的磁力。由于车体下部的磁场呈弧形分布，因而该磁力同时具有为列车导向的功能。据介绍，当车体静止和开始运动时，是由车轮支撑着的；当车速达到 20km/h 以上时，永磁式磁浮列车的车轮将离开轨道，其悬浮间隙约为 50~150mm、最高时速可达 400~500km。也就是说，永磁式磁浮列车系统的圆弧形铝导轨既需要为高速运行服务，也需要为低速运行服务。

6.4.2 转线设备

转线设备是轨道交通系统中不可缺少的装备。因为电动斥力型列车低速行进时是靠车轮滚动前进的，所以这类系统的转线设备也不同于电磁吸力型系统。

6.4.2.1 山梨试验线使用道岔

在山梨试验线上使用了 3 种形式的道岔，即轨道梁平移式道岔、侧壁移动式道岔和车辆基地道岔。前两种道岔的转移时间均在 30s 以内，后者仅用于维修基地的库线，结构比较简单。

(1) 轨道梁平移式道岔也称高速道岔，是 MLX 系统的主要道岔。类似于 TR 型系统的道岔，它也要移动轨道梁，

但它不同于 TR 型系统的可弯曲钢构连续梁。它是由 6 段可用液压（或电动）设备分段平移的混凝土 U 形槽式轨道梁结构。当直线前进的列车过岔时，道岔在主线（直线）位，列车可以悬浮着高速通过；当列车需换线时，道岔处于侧线位。道岔范围内各轨道梁被移置成与正线相切的平曲线，列车靠车轮支承和导向通过。

由于道岔上不设超高，当换线列车以速度 v 通过道岔曲线时，产生的离心加速度就是未被平衡离心加速度 a_y 。 v 越高 a_y 越大（表 2.7-6），旅客越不舒适，导向轮上传递出的集中荷载对轨道梁一侧导板（其上有 8 字形线圈等）的破坏作用也越大。所以，为了旅客的舒适，也为了保障道岔结构物的安全，列车侧向通过道岔时的运行速度应不超过一定值。例如，若限定离心加速度不超过 0.5m/s^2 ，则在道岔曲线半径为 800m 或 600m 时，过岔速度应在 70km/h 或 60km/h 左右为宜。

表 2.7-6 侧向过岔车速与离心加速度 m/s^2

道岔曲线半径 (m)	过岔速度 (km/h)									
	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
800	0.35	0.47	0.62	0.78	0.97	1.17	1.39	1.63	1.89	2.17
600	0.46	0.63	0.82	1.04	1.29	1.56	1.85	2.18		

(2) 侧壁升降式道岔又称低速道岔，这种道岔通过把其中部的内侧侧壁上下升降，而两端的内侧侧壁左右移（摆动），来改换道岔通道，使之开通主线位或侧线位。

(3) 车辆基地用道岔是供列车进出库时使用的道岔，由铺设在给定平面上的导向钢轨来实现对车辆的导向。

6.4.2.2 永磁式磁浮列车的“道岔”

据介绍，永磁式磁浮列车的“道岔”没有机械移动部件，整个“道岔”区类似道路的平面交叉。过“道岔”车辆的方向主要靠牵引磁场的导向力。这种电磁道岔的可行性仍待研究。



第8章 电磁兼容

1 概述

铁路遍布祖国的大江南北,既经过人口稠密的繁华都市,也经过人迹稀少的崇山峻岭。作为流动载体的列车,不论天气如何,它都将奔驰在万里铁道线上。沿途可能经过发电厂、变电站及飞机场,不仅要经受来自广播电视、无线通信、导航雷达及电厂、变电所等的电磁干扰,还会遭受来自太空宇宙的电磁爆及雷电的干扰。

近年来,随着电力电子器件的不断发展以及计算机控制技术在铁路机车车辆上的广泛应用,已逐渐形成了电力和电子设备互相结合、强电和弱电配合工作的机电一体化系统,电磁环境变得日益恶化。强电和弱电本身是不相容的,但又必须在同一个系统内工作,这就使电磁兼容成为机车车辆能否正常工作的一个关键性问题。

重载、高速,电气化铁路必将成为未来铁路的发展方向。干线铁路普遍采用 50Hz,单相 25kV 交流供电。电力机车经受电弓从 4.6m 高的接触网上接受电能,经牵引变压器、变流器、牵引电动机,再经轮对、轨道回流至变电所。列车在高速行驶中,受电弓会因弹跳而在接触网之间产生拉弧,产生强烈的电磁干扰;变流器由于电力电子开关器件工作的非线性, di/dt , dv/dt 的突变,现在的机车功率又越来越大,已达 10000kW,不可避免地产生强烈的电磁干扰,不仅对列车本身,而且对铁路沿线的广播电视、通信、导航雷达等产生不利影响。

现以“奥星”交一直—交电力机车为例,说明其总体布置。奥星车体宽度为 3m 左右,长度为 15m,面积为 45m²,不仅分布着 4800kW 的主电路,其中有牵引变压器、变流器、4 台异步牵引电动机,而且还有 100kW 的辅助变流器组成机车的辅助电路,网络、微机控制分布其中。车头两端 6m² 的空间内,分布着机车“黑匣子”、无线通信、机车行车控制信号等,还有空调、取暖设备及电磁灶。列车作为电力和微机网络控制设备相结合,强、弱电配合工作的机电一体化系统,确保列车安全,机车的正常工作至关重要。

要想让机车正常工作,同时对铁路沿途的通信、电视广播等不受电气化铁路的干扰与影响,研究铁路机车车辆的电磁兼容问题已成为确保机车车辆能否正常工作的关键,显得尤为重要和迫切。

为保证章节的完整性及可读性,本章简要介绍了电磁兼容的基本概念以及常用的手段与方法,重点介绍设计要点及试验要求等。

2 电磁兼容的基本知识

2.1 定义

设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

由此可见,电磁兼容学科主要研究的是如何使在同一电磁环境下工作的各种电气、电子系统、分系统、设备和元器件都能正常工作,互不干扰,达到兼容状态。

2.2 电磁兼容研究的基本内容

(1) 电磁骚扰特性及其传播方式的研究。人们为了有效地控制电磁骚扰,首先得摸清骚扰的特性和它的传播方式,如根据骚扰频谱分布可了解骚扰特性是属于窄带的还是宽带的;根据作用的时间可以把骚扰分成连续的、间歇的,或是瞬变的;按传播方式骚扰又可分为传导、辐射、感应或共地阻抗耦合等几类。

(2) 电磁兼容控制技术。最常用的是屏蔽、滤波、接地。屏蔽用于切断空间的辐射发射途径;滤波用于切断通过导线的传导发射途径;接地的好坏则直接影响到设备内部和外部的电磁兼容性。电磁兼容控制技术的研究又必然促进高性能元器件、功能模块和新型结构及防护材料的研制。控制方案应关注效/费比的综合分析,所谓效/费比就是对采取的各种电磁兼容性措施进行成本和效能的分析比较,如果设计中既满足了高性能指标,又能达到花钱最少的目的,就获得了最佳的效/费比。

(3) 电磁兼容性频谱利用的研究。无线电频谱是一个有限的资源,如何合理地利用无线电频谱,防止频谱污染,消除电磁骚扰对武器装备和人体的危害、预防电子系统之间和系统内设备间的相互干扰,已引起人们的高度重视及普遍关注。

(4) 电磁兼容测量的研究。电磁兼容测量贯穿于电磁兼容分析、建模、产品开发、检验诊断等各个阶段,由于测量对象是电磁骚扰,不同于一般有用信号,因此骚扰的拾取、度量和误差分析等都有自己的特点,对于测量方法、仪器设备、测量场地的研究是电磁兼容学科的重要组成部分。

(5) 电磁兼容性规范、标准的研究。电磁兼容性规范、标准是电磁兼容性设计的主要依据,通过制定规范、标准来限制电子系统或设备的电磁发射,提高敏感设备的抗扰度,从而使设备相互干扰的可能性大大下降,力求防患于未然。

(6) 电磁兼容分析预测和设计。分析、预测和设计是电磁兼容学科发展的高级阶段。其关键在于数学建模和计算机分析程序的编制。数学模型包括根据实际电路、布线和参数建立起来的全部骚扰源、传输途径和敏感部件的模型;分析程序应能计算所有骚扰源通过各种可能途径对每个敏感部件的影响,并判断这些综合影响的危害是否超出相应标准的限值要求和设计要求,然后进行修整补充和再计算,系统越复杂,分析和预测的难度就越大。

2.3 电磁干扰的三要素

电磁骚扰源、传输途径和敏感设备,统称为电磁干扰三要素。如图 2.8-1 所示。

2.3.1 电磁骚扰源

电磁骚扰源可分为自然骚扰源和人为骚扰源两大类。

2.3.1.1 自然骚扰源

由自然界的电磁现象产生的电磁噪声,如:

(1) 大气噪声。如雷电,能谱主要集中在 20MHz 以下。

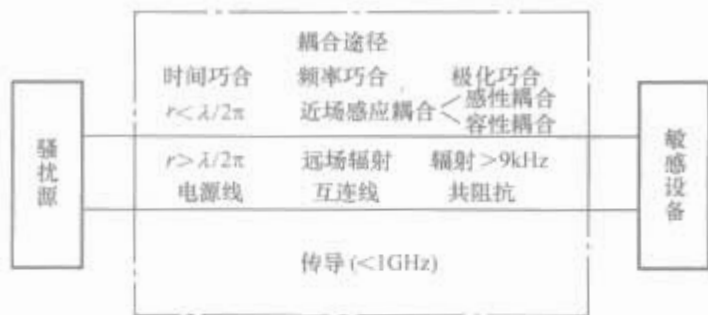


图 2.8-1 电磁干扰过程三要素

- (2) 太阳噪声。太阳黑子活动时产生的磁暴。
 - (3) 宇宙噪声。来自银河系，其能谱在 10MHz ~ 30GHz 频率范围内。
 - (4) 静电放电。
- 由于雷电的强度很大，即使远离雷电区，其骚扰场强仍相当可观。遥远的雷电产生的骚扰可认为是波动的；邻近的雷电骚扰则是脉冲型的，一般雷电骚扰属准脉冲型。

2.3.1.2 人为骚扰源

由电力电子、设备和其他人工装置产生的电磁骚扰。这些骚扰包括功能性的无用信号和非功能性的电磁噪声，例如：

- (1) 家用电器和民用设备。
 - 1) 有触点电器。
 - 2) 使用换向器电动机的机器。
 - 3) 家用电力半导体器件装置。开关电源等。
- (2) 高频设备。例如工业用高频设备。
- (3) 电力设备，例如：
 - 1) 电力传动设备。
 - 2) 电力电子器件构成的变流装置。
 - 3) 电力传输设备的高压电力传输线、高压断路器、变压器等。
- (4) 电气化铁道的电力机车，接触网等。
- (4) 内燃机的点火系统、发电机、电压调节器，电刷等。
- (5) 无线电发射和接收设备的移动通信系统、广播、电视、雷达、导航设备等。
- (6) 高速数字电路设备的计算机及其相关设备。
- (7) 几种人为骚扰源产生干扰的机理，例如：

- 1) 电动工具、家用电器、照明器具及类似设备。它们在起动、工作和切断时都会产生电磁骚扰。荧光灯是利用气体电击穿原理工作的，电击穿瞬间会产生射频噪声，既可经荧光本身向外辐射，也可由连接荧光灯的电源线引起传导发射。晶闸管整流器和调速系统的脉冲导通，往往向电网吸收很大的瞬态电流，造成电网电压的瞬间跌落和电源波形畸变，因此它们对电网的污染是十分严重的。
- 2) 机动车辆和内燃机。汽车、摩托车等机动车辆和有点火系统的发动机运行时，它们的火花塞会产生电磁骚扰。
- 3) 工业、科学用射频设备。它们大多没有专设的发射天线，但由于机箱的屏蔽、接地及电源滤波不佳等因素，造成电磁能量通过辐射或沿电源线向外传导，产生严重的电磁干扰。
- 4) 电力设备。当运行中的电力设备表面电场强度超过空气起晕临界场强或存在接触不良的小间隙时，就会在导体表面和间隙中产生电晕、火花放电或刷形放电。这一连串的放电脉冲将形成宽带电磁骚扰，频谱一般从几万赫到几百兆赫。电力机车上的受电弓，由于跳动或抖动，在接触网与受电弓之间经常出现部分接触不良，形成放电间隙，产生随机

或周期性的脉冲骚扰，循着导线传导，并向空间辐射电磁波，从而对其他设备和人员造成干扰。

5) 信息技术设备及工业控制设备。这类设备内部的骚扰源主要有开关电源、时钟振荡器及频率变换器、高速逻辑电路等。开关电源及时钟振荡器所产生的电磁骚扰主要是它们的基波与谐波等窄带干扰，而脉冲信号则是频谱很宽的宽带干扰源。凡是有电压或电流突变的场合，一定存在电磁干扰。

6) 发射设备。通信、广播、雷达等发射机都发射很强的电磁波，对相应的接收机而言它是传递信息的信号源，而对其他电子设备和仪器则是骚扰源。它的发射，既可经天线或机箱本身向外辐射，也可沿互连线或电源线向外传导。

2.3.1.3 静电

人体常带有静电，当用手触摸电子设备时，常因瞬间的静电放电而使设备受到干扰，甚至损坏设备内的半导体器件。静电产生的原因是两种不同物质的物体互相摩擦，正、负电荷分别积蓄在两种物体上，形成高电压。其计算公式为

$$U = Q/C \tag{2.8-1}$$

式中：Q 为人体所带电荷；C 为人体对地电容；U 为人体感应电压。

$$W = 1/2CU^2 \tag{2.8-2}$$

式中：W 为静电所含能量。

抑制静电放电干扰的方法大致有以下几种：

- (1) 防止静电的产生，机房的工作台和地板应铺设防静电材料，操作人员不穿化纤等易产生静电的衣服，手腕处最好佩带接地扣带，保持机房相对湿度在 45% 以上等。
- (2) 在人手和内部电路间建立隔离层，阻止放电的发生。如用绝缘机壳或在设备外壳上涂绝缘漆或贴层绝缘薄膜，使绝缘能力大于 20kV。
- (3) 一旦发生静电放电，应让其尽快旁路入地，不要直接侵入内部电路。
- (4) 在内部电路上加强防护措施，对于静电放电产生的辐射干扰，应注意印制电路板设计，尽量减少各信号环路的面积，不要有浮置的管脚等。

2.3.2 电磁骚扰的传播

骚扰可以通过导线传播，即通过设备的信号线、控制线、电源线、通信线等直接侵入敏感设备，这种方式称为传导干扰；骚扰源周围空间存在着电场和磁场，会对附近的敏感设备产生干扰，这种方式称近场感应耦合干扰；骚扰能量也会以电磁波的形式向外传输，从而影响远处的敏感设备，这种方式称为远场辐射干扰。近场感应耦合干扰与远场辐射干扰，统称为辐射干扰。

2.3.2.1 传导干扰

(1) 沿电源线传导的电磁骚扰。电网中连接着各种电气、电子和机械设备，这些设备在起动、工作、切换时都会向电网传输频谱相当宽的电磁干扰。此外，在电子系统或电子设备内部，也会通过公共电源线构成各部分的相互干扰，如图 2.8-2 所示。

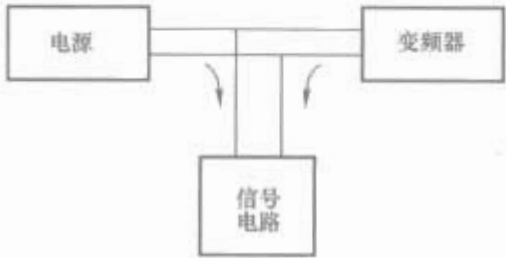


图 2.8-2 沿电源线的传导干扰

(2) 通过公共电源内阻的耦合。如图 2.8-3 所示, 当几个设备或电路单元共用电源时, 当电路 2 的电源电流发生任何变化时都会以电源内阻 R_s 和公共连线阻抗 R 影响到电路 1 的工作。

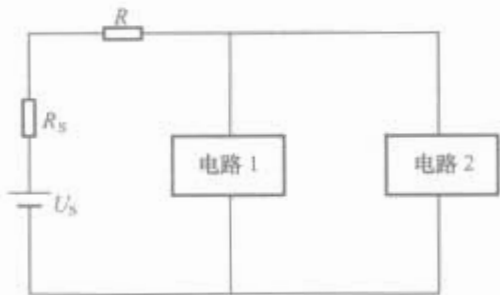


图 2.8-3 公共电源内阻耦合

(3) 通过公共地线阻抗的耦合。在电子系统或电子设备内部, 往往几个设备或电路单元的电流流经一条公共地线, 如图 2.8-4 所示。各单元的电流在流过地线阻抗 R_g 时就会产生压降, 造成各单元对地电压的相互影响和牵制。

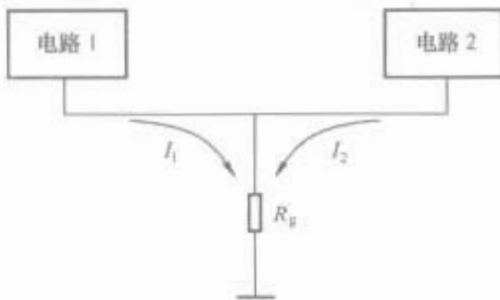


图 2.8-4 公共地线阻抗耦合

2.3.2.2 辐射干扰

将骚扰源周围空间划分为两个区域: 紧靠骚扰源的区域称为近场区或感应场区; 距离大于 $\lambda/2\pi$ 的区域称为远场区或辐射场区。

感应场区又可分为电容耦合和电感耦合两种形式。

电容耦合如图 2.8-5 所示, 其耦合程度取决于骚扰源或敏感设备间的分布电容的大小、骚扰源和敏感设备的阻抗及频率范围, 在高阻抗的高频电路中最易产生电容耦合。

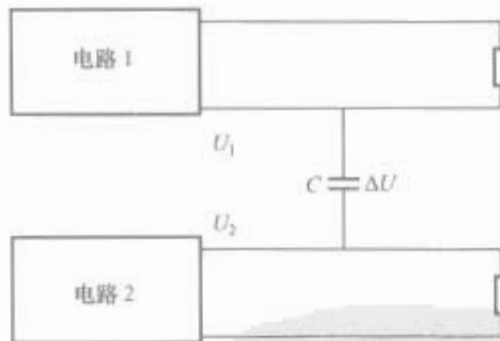


图 2.8-5 电容耦合途径

电感耦合如图 2.8-6 所示。在电路 2 中感应电压 $U_2 = M \frac{di_A}{dt}$, 影响干扰耦合大小的因素有电流 i_A 的频率, 两导线间的距离以及并行在一起的公共走线的长度。在低阻抗或低压大电流的电路中, 易产生电感耦合。

在远场区, 骚扰源发射的电磁能量将以电磁波的形式,

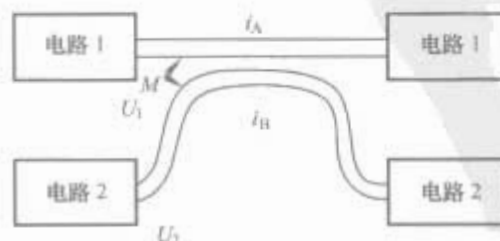


图 2.8-6 电感耦合途径

通过空间传播作用于敏感设备。

2.4 电磁场理论基础

当场源的电流或电荷随时间变化时, 就有部分电磁能量进入周围空间, 这种现象称为电磁能量的辐射。研究电磁场最常用的是麦克斯韦方程

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2.8-3)$$

式中: \mathbf{D} 为电通密度; \mathbf{B} 为磁通密度; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{J} 为 (体) 电流密度。

2.5 电偶极子的电磁辐射

电偶极子是指一根载流导线, 它的长度 Δl 与横向尺寸都比电磁波长小得多。假设沿长度方向上的电流是均匀的, 导线长度 Δl 比场中任意点与电偶极子的距离小得多, 即场中任意点与导线上各点的距离可以认为是相等的, 电偶极子经传输线接于高频源上, 如图 2.8-7 所示。

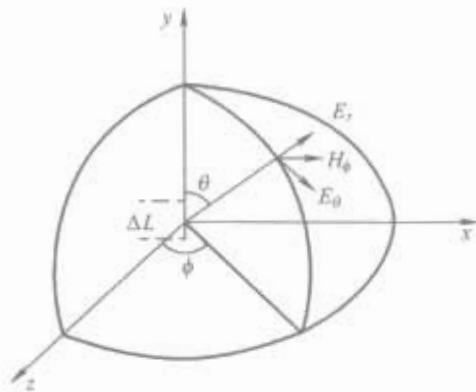


图 2.8-7 电偶极子辐射源

将电偶极子中心放于直角坐标原点, Δl 沿 y 轴方向安放, 设电偶极子上电流作余弦变化, 即 $i = I_m \cos \omega t$, 那么, 电偶极子在介质中产生的电磁场亦是时间的余弦函数, 自由空间的电荷密度 ρ , 传导电流密度 \mathbf{J} , 以及电导率 σ 均为零, 麦克斯韦方程的微分形式可表达为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = j\omega \epsilon \mathbf{E} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -j\omega \mu \mathbf{H} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.8-4)$$

由上述方程组可解得电偶极子周围的电磁场为

$$H_\phi = \frac{I_m \Delta l}{4\pi} k^2 \left[\frac{-1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \frac{1}{(kr)^2} \cos(\omega t - kr) \right] \sin\theta \quad (2.8-5)$$

$$E_r = \frac{I_m \Delta l}{2\pi\omega\epsilon} k^3 \left[\frac{1}{(kr)^2} \cos(\omega t - kr) + \frac{1}{(kr)^3} \sin(\omega t - kr) \right] \cos\theta \quad (2.8-6)$$

$$E_\theta = \frac{I_m \Delta l}{4\pi\omega\epsilon} k^3 \left[\frac{-1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \frac{1}{(kr)^2} \cos(\omega t - kr) + \frac{1}{(kr)^3} \sin(\omega t - kr) \right] \sin\theta \quad (2.8-7)$$

式中: $I_m \Delta l$ 为电偶极子的电矩; r 为从坐标中心到观察点的距离; k 为波数, 电磁波传播单位长度所引起的相位变化,

$k=2\pi/\lambda。$

2.5.1 近场区 (感应场区)

在 $r\ll\lambda/2\pi$ 的区域内, $kr\ll1$, 由式(2.8-5)~式(2.8-7)可见, 电偶极子产生的场分量主要取决于 $1/(kr)$ 的高次项, 即

$$\left. \begin{aligned} H_{\phi} &\approx \frac{I_m \Delta l}{4\pi r^2} \sin\theta \cos\omega t \\ E_r &\approx \frac{I_m \Delta l}{2\pi\omega \epsilon r^3} \cos\theta \sin\omega t \\ E_{\theta} &\approx \frac{I_m \Delta l}{4\pi\omega \epsilon r^3} \sin\theta \sin\omega t \end{aligned} \right\} \quad (2.8-8)$$

2.5.2 远场区 (辐射场区)

在 $r\gg\lambda/2\pi$ 的区域内, $kr\gg1$ 。该区域内的分量主要取决于式(2.8-5)~式(2.8-7)中 $1/(kr)$ 的低次项, 而且 E_r 与 E_{θ} 相比可忽略, 故在波的传播方向上的电场分量近似为零, 近似得到如下公式

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta} &\approx \frac{-k^2 I_m \Delta l}{4\pi\omega \epsilon r} \sin\theta \sin(\omega t - kr) \\ H_{\phi} &\approx \frac{-k I_m \Delta l}{4\pi r} \sin\theta \sin(\omega t - kr) \end{aligned} \right\} \quad (2.8-9)$$

从式 (2.8-9) 可看出, 无论 E_{θ} 还是 H_{ϕ} , 幅值都和 ϕ 角无关, 仅与 θ 角有关, 且正比于 $\sin\theta$ 。在 $\theta=90^\circ$ 的方向, 即在垂直于偶极子轴线上场强 E_{θ} 与 H_{ϕ} 为最大。

工程上常利用式(2.8-8)与式(2.8-9)计算电偶极子周围场强的值, 例如当 $\Delta l=1\text{cm}$, $I_m=1\text{A}$ 时, 不同距离上的场强大小, 见表 2.8-1。

表 2.8-1 距电偶极子不同距离的场强

频率 (MHz)	场 强	距 离 (cm)			
		1	10	100	1000
1	E (dB · $\mu\text{V/m}$)	263	203	143	84
	H (dB · $\mu\text{A/m}$)	137	97	58	18
10	E (dB · $\mu\text{V/m}$)	243	183	123	76
	H (dB · $\mu\text{A/m}$)	137	97	59	24

2.6 磁偶极子的电磁辐射

磁偶极子由一对假想的相距极小的正、负磁荷 ($+q_m$, $-q_m$) 组成; 直径远小于波长的小环天线亦可作为磁偶极子处理。将通电小环置于 xz 平面上, 环中心与坐标原点重合, 如图 2.8-8 所示。设小圆环半径为 a , 流过电流为 $i_m=I_m\sin\omega t$, 则可求得在空间某点处的电场与磁场的表达式

$$\left. \begin{aligned} E_{\phi} &= \frac{I_m a^2 k^4}{4\epsilon\omega} \left[\frac{-1}{kr} \cos(\omega t - kr) - \frac{1}{(kr)^2} \sin(\omega t - kr) \right] \sin\theta \\ H_r &= \frac{I_m a^2 k^3}{2} \left[-\frac{1}{(kr)^2} \sin(\omega t - kr) + \frac{1}{(kr)^3} \cos(\omega t - kr) \right] \cos\theta \\ H_{\theta} &= \frac{I_m a^2 k^3}{4} \left[\frac{-1}{kr} \cos(\omega t - kr) - \frac{1}{(kr)^2} \sin(\omega t - kr) + \frac{1}{(kr)^3} \cos(\omega t - kr) \right] \sin\theta \end{aligned} \right\} \quad (2.8-10)$$

式中: a 为小圆环半径; k 为从坐标中心到观察点的距离; k 为波数 ($k=2\pi/\lambda$, λ 为波长)。

2.6.1 近场区 (感应场区)

在 $r\ll\lambda/2\pi$ 的区域内, $kr\ll1$, 由式 (2.8-10) 可知磁偶极子产生的场分量主要取决于 $1/(kr)$ 的高次项, 即可得如

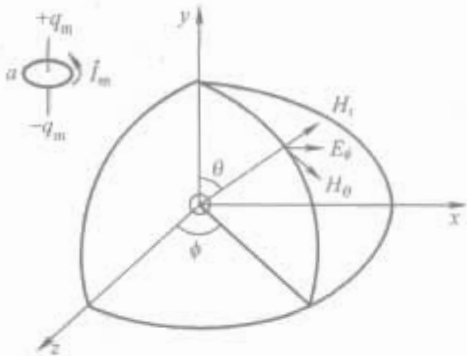


图 2.8-8 磁偶极子辐射源

下方程

$$\left. \begin{aligned} E_{\phi} &\approx \frac{-I_m a^2 k^2}{4\epsilon\omega r^2} \sin\theta \sin\omega t \\ H_r &\approx \frac{I_m a^2}{2r^3} \cos\theta \cos\omega t \\ H_{\theta} &\approx \frac{I_m \Delta l}{4r^3} \sin\theta \cos\omega t \end{aligned} \right\} \quad (2.8-11)$$

2.6.2 远场区 (辐射场区)

在 $r\gg\lambda/2\pi$ 的区域内, $kr\gg1$ 。该区域内的场分量主要取决于式 (2.8-10) 中 $1/(kr)$ 的低次项, 而且 H_r 与 H_{θ} 相比可忽略, 因此在波的传播方向上的磁场分量近似为零, 可得到如下方程

$$\left. \begin{aligned} H_r &\approx 0 \\ H_{\theta} &\approx \frac{-I_m a^2 k^2}{4r} \sin\theta \cos(\omega t - kr) \\ E_{\phi} &\approx \frac{-I_m a^2 k^3}{4\epsilon\omega r} \sin\theta \cos(\omega t - kr) \end{aligned} \right\} \quad (2.8-12)$$

由式 (2.8-12) 可见, 在磁偶极子的远场区, 电磁场与空间的关系完全和电偶极子相仿, 当 $\theta=90^\circ$ 时, 即在小圆环所在平面上, 电场与磁场为最大。

工程上也常常利用式 (2.8-10) 及式 (2.8-11) 进行估算, 估算小圆环周围场强值, 当 $a=0.564\text{cm}$, $I_m=1\text{A}$ 时, 其周围的场强值见表 2.8-2。

表 2.8-2 磁偶极子不同距离的场强

频率 (MHz)	场 强	距 离 (m)			
		1	10	100	1000
1	E (dB · $\mu\text{V/m}$)	116	76	36	-4
	H (dB · $\mu\text{A/m}$)	138	78	18	-42
10	E (dB · $\mu\text{V/m}$)	136	96	56	22
	H (dB · $\mu\text{A/m}$)	138	78	18	-29

2.7 近场区及远场区的特性

2.7.1 近场区

2.7.1.1 波阻抗

常常将 $r<\lambda/2\pi$ 的区域作为近场区, 波阻抗是电磁波中电场分量与磁场分量之比, 即

$$Z=E/H \quad (2.8-13)$$

电偶极子近场区的波阻抗为

$$Z_{en}=E_{\theta}/H_{\phi}=\frac{1}{j\omega \epsilon_0 r} \quad (2.8-14)$$

磁偶极子近场区的波阻抗为

$$Z_{mn}=E_{\phi}/H_{\theta}=j\omega \mu_0 r \quad (2.8-15)$$

2.7.1.2 近场区电磁场的特点

(1) 由波阻抗表达式可见, 无论是电偶极子还是磁偶极子, 它们在近场区的阻抗都是虚数, 即近场区的电场与磁场相位相差 90° , 存在能量交换; 两种偶极子的波阻抗在量值

上都是频率的函数,但变化规律不同,电偶极子的阻抗高于磁偶极子的波阻抗,故前者是容性耦合的高阻抗场,后者是感性耦合的低阻抗场。将近场区的电场、磁场瞬时波形画出,就得到如图 2.8-9 所示的坡印廷矢量图。由于 E_θ 与 H_ϕ 相位差 90° ,当 E_θ 为最大值时, H_ϕ 为零,坡印廷矢量为零;若 t_1 时刻的坡印廷矢量 S_1 为正向传送,则到 t_2 的 S_2 就反向传送,表明感应的电磁场能量在 r 方向作往返振荡。

(2) 在感应场中,感应情况不仅取决于场源性质及耦合方式,而且还取决于被感应导体的状况、所在位置及周围环境条件,甚至感应体的存在,也会扰乱原先的电磁场分布。

(3) 近场区的电场和磁场方向处在以场源为中心的大曲率半径的球面上。在电偶极子的近场区,感应电场强度按 $1/r^3$ 规律减小,磁场强度按 $1/r^2$ 的规律减小;在磁偶极子的近场区,则刚好相反。感应磁场强度按 $1/r^3$ 规律减小,电场强度按 $1/r^2$ 规律减小。另外,场分布在 θ 方向的变化也很大。因此在近场区测量电磁干扰,测试数据对距离十分敏感,测量时,不但要分别记录各测量点的电场强度和磁场强度,还应注明测量距离和测量天线的规格。在结构设计中,大部分设备内的布局属于近场范围,有意识地利用空间距离衰减,就可降低对屏蔽设计的要求。从电磁兼容性出发考虑布局,这是效/费比较高的一项措施。

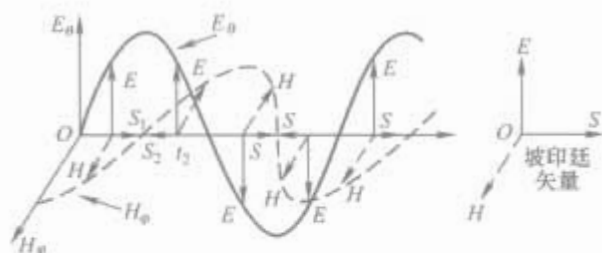


图 2.8-9 近场区的坡印廷矢量

(4) 理想的电偶极子和磁偶极子是不存在的。对于一些高压小电流的场源,都可看作等效的电偶极子场源,其近场区的电磁场以容性高阻抗电场为主。而对于设备中的一些低压大电流器件及电感线圈等场源,可视作等效的磁偶极子场源,其周围电磁场呈现感性低阻抗磁场特征。这对解决电磁兼容问题,具有指导意义。

2.7.2 远场区

2.7.2.1 平面电磁波

通常把离开偶极子源距离 $r \gg \lambda/2\pi$ 的区域称为远场区。在远场区,电磁场只有与传播方向垂直的两个场分量 E_θ 、 H_ϕ 或 H_θ 、 E_ϕ ,在传播方向没有场分量,称为横电磁(TEM)波或平面电磁波。图 2.8-10 所示为平面电磁波中电场与磁场的瞬时分布。

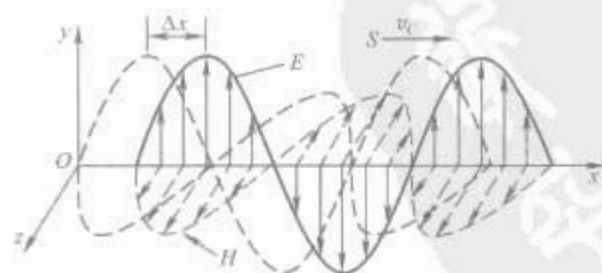


图 2.8-10 远场区平面波的瞬时场分布

平面电磁波具有如下特征:

- (1) 电磁波的 2 个场分量电场与磁场在空间相互垂直且在同一平面上。
- (2) 电场和磁场在时间上同相位。
- (3) 平面波在自由空间的传播速度就是光速 $v_c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

(4) 自由空间电场和磁场分量的比值为—常数,与场源的特性和距离无关, Z_w (波阻抗) $= 120\pi = 377\Omega$ 。

(5) 平面波中电场的能量密度 W_e 和磁场能量密度 W_m 各为电磁波总能量的一半,即

$$W_e = \omega E^2 / 2$$

$$W_m = \mu H^2 / 2$$

$$W = W_e + W_m = 2W_e = 2W_m$$

(6) 电磁波能量的传播方向由坡印廷矢量确定,可用 $S = E \times H$ 来表示。

(7) 电场与磁场均随离开场源的距离成反比地减小(见图 2.8-11),电磁兼容性测试时常利用这种关系进行电磁发射限值转换,例如,在 IEC 62236 标准(铁路应用,电磁兼容)中,规定在 30~230MHz,被试设备的 10m 准峰值限值为 40dBμV/m,当改为 3m 距离测量时,限值将增加到 50dBμV/m。

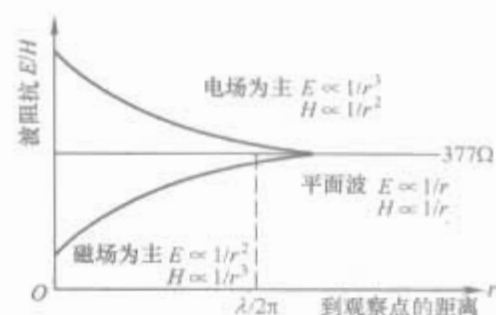


图 2.8-11 电偶极子和磁偶极子的空气波阻抗

2.7.2.2 空气、导体波阻抗与场源特性、波长、距离的关系

从上面的内容可知:近场区与远场区的波阻抗有明显的区别,图 2.8-11 给出了自由空间不同场区的波阻抗随频率及距离变化的关系,进入远场区之后,波阻抗将趋向恒定的 377Ω 。

导电媒质的波阻抗可由电磁波在远场区自由空间传播时的波阻抗表达式 ($Z_w = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$) 推出,只需以导体的复介质常数 $\dot{\epsilon} = \epsilon - j(\sigma/\omega)$ 代替自由空间的 ϵ_0 ;导体的波阻抗以 \dot{Z}_s 表示,则

$$\dot{Z}_s = \sqrt{\frac{\mu}{\dot{\epsilon}}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon - j(\sigma/\omega)}} = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\omega \epsilon - j\sigma}} \quad (2.8-16)$$

对良导体而言:有 $\sigma \gg \omega \epsilon$,则

$$\dot{Z}_s \approx \sqrt{\frac{\omega \mu}{-j\sigma}} = (1+j) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}} e^{j\pi/4} = |\dot{Z}_s| e^{j\pi/4} \quad (2.8-17)$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}}$$

式中: μ 为导体的磁导率,非铁磁性材料 $\mu = \mu_0$; σ 为导体的电导率; ω 为电磁波的角频率。

从 Z_s 的表达可见,电磁波在良导体内传播时,电场与磁场相位差 $\pi/4$,而且由于导体引入的损耗,其幅度将按指数规律下降。

对于只提供相对电导率 σ_r 和相对磁导率 μ_r ,则式(2.8-17)可变为

$$|\dot{Z}_s| = Z_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}} = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r f}{\sigma_r}} \quad (2.8-18)$$

对于铜而言, $\sigma_{cu} = 5.8 \times 10^7$,在 $f = 1\text{MHz}$ 时, $Z_s = 0.368\text{m}\Omega$ 。

另外，对于良导体中的平面波，相速为

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$$
$$\delta_c = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{f\pi\mu\sigma}} \tag{2.8-19}$$

式中： μ 为媒质的磁导率； σ 为媒质的电导率； δ_c 为集肤深度； β 为相位常数。

当波在良导体中传播时，实际上波传播 $5\delta_c$ 的距离后即消失于导电媒质中。在 1MHz 频率下，铜的集肤深度 δ_c 约为 0.07mm。波在透入 0.35mm 距离后振幅已小到无意义。因此，良导体中，波衰减很快。

2.8 传输线基础

传输线是一种能在两点之间高效率地传输功率与信号的器材。场源产生的能量沿着传输线所引导的方向，以横电磁波模式传播，即在传输过程中电场和磁场相互垂直，且都垂直于传输线导向的传播方向。传输线一般可分为以下 3 类：

- (1) 双线传输线。由一对相隔一定距离的平行导线构成。
- (2) 双线平行板传输线。由两块被厚度均匀的介质片所隔开的平行导体构成。
- (3) 同轴线。由介质隔开的内导体与同轴外导体构成。

在实际使用中，传输线具有电阻、电容、电感特性，尤其在频率较高时，这些分布参数对信号的传输有着十分重要的影响。

2.8.1 传输线的方程组

当传输线的长度已可与传输信号的波长相比拟，甚至超过很多个波长时，它的分布参数已直接影响到信号的传输，因此，必须用分布于整个长度的电路参数来描述其自身的特性。除了匹配状态之外，在传输线上一般都有驻波分量存在。

取传输线上的一个微分长度元 Δx ，其等效电路如图 2.8-12 所示。它的特性可由 4 个参数来描述： R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 。

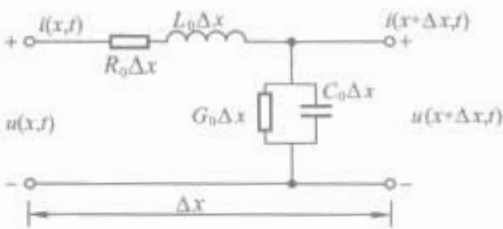


图 2.8-12 双线传输线的等效电路
 R_0 —单位长度 2 个导体的电阻 (Ω/m)；
 L_0 —单位长度 2 个导体的电感 (H/m)；
 G_0 —单位长度 2 个导体间的电导 (S/m)；
 C_0 —单位长度 2 个导体间的电容 (F/m)

假设该双线传输的是稳态正弦信号，由基尔霍夫定律可求得下列传输线方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{U}(x)}{dx} &= (R_0 + j\omega L_0) \dot{I}(x) \\ \frac{d\dot{I}(x)}{dx} &= (G_0 + j\omega C_0) \dot{U}(x) \end{aligned} \right\} \tag{2.8-20}$$

$$\dot{\Gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \tag{2.8-21}$$

式中： $\dot{\Gamma}$ 为传播常数； α 为衰减常数， $\text{N}_{\text{ep}}/\text{m}$ ； β 为相位常数， rad/m 。

解式 (2.8-20) 得

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}(x) &= \dot{A}e^{-\dot{\Gamma}x} + \dot{B}e^{\dot{\Gamma}x} \\ \dot{I}(x) &= (\dot{A}/\dot{Z}_c)e^{-\dot{\Gamma}x} - (\dot{B}/\dot{Z}_c)e^{\dot{\Gamma}x} \\ \dot{Z}_c &= \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \end{aligned} \right\} \tag{2.8-22}$$

式中： \dot{Z}_c 为传输线的特性阻抗； \dot{A} 和 \dot{B} 为由边界条件决定的待定常数。

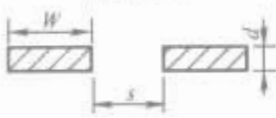
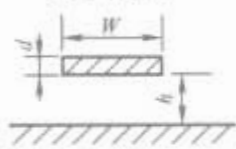
(1) 无限长传输线。当 $R_0=0$ ， $G_0=0$ ，由式 (2.8-22) 可简化得出：

- 1) 传播常数 $\dot{\Gamma} = j\omega \sqrt{L_0 C_0} = \alpha + j\beta$ ， $\alpha=0$ 时， $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}$ ，因而相速为 $v=1/\sqrt{L_0 C_0}$ 。
 - 2) 特性阻抗 $\dot{Z}_c = R + jx = L_0/C_0$ 。
- (2) 传输线的基本参数，见表 2.8-3。

表 2.8-3 传输线的基本参数

导线类型	分布电感 L (H/m)	分布电容 C (F/m)	特性阻抗 Z_0 (Ω)
平行导线对 	$\frac{\mu}{\pi} \ln\left(\frac{s}{r}\right)$	$\frac{\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{s}{r}\right)}$	$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{s}{r}\right)$
地上导线 	$\frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)$	$\frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)$
同轴电缆 	$\frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$	$\frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$
平行微带线 	$\frac{l\pi}{W}$	$\frac{\epsilon W}{s}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{s}{W}$

续表

导线类型	分布电感 $L(\text{H/m})$	分布电容 $C(\text{F/m})$	特性阻抗 $Z_0(\Omega)$
平行微带线 	$\frac{\mu}{\pi} \ln\left(\frac{\pi s}{W+d}\right)$	$\frac{\pi \epsilon}{\ln\left(\frac{\pi s}{W+d}\right)}$	$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{\pi s}{W+d}\right)$
地上微带线 	$\frac{\mu h}{W}$	$\frac{\epsilon W}{h}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{h}{W}$

2.8.2 传输线上的反射及驻波

2.8.2.1 传输线的输入阻抗

在许多情况下,传输线终端的端接负载 Z_L 不一定等于 Z_c ,工程上对这种终端不匹配的传输线输入阻抗 Z_i 极为关注,因为它直接影响信号的传递,如图 2.8-13 所示。

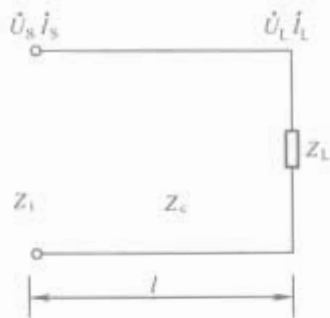


图 2.8-13 端接负载 Z_L 的传输线

在大数情况下,传输线段可看作是无损耗或低损耗的,即 $\dot{Z}_i = \sqrt{L_0/C_0}$, $\dot{\Gamma} = j\beta$ 故有

$$\dot{Z}_i = \frac{\dot{Z}_L + j\dot{Z}_c \tan \beta l}{\dot{Z}_c + j\dot{Z}_L \tan \beta l}$$

(2.8-23)

2.8.2.2 开路传输线

当 $Z_L = \infty$ 时,式 (2.8-20) 可简化为

$$\dot{Z}_{i\infty} = -j\dot{Z}_c \cot \beta l$$

(2.8-24)

式 (2.8-24) 表明:

- (1) 无损耗开路传输线的输入阻抗是纯电抗的。
- (2) $\cot \beta l$ 既可为正,也可为负,开路传输线输入阻抗呈现容性还是感性,具体由线上相位滞后量 $\beta l (= 2\pi l/\lambda)$ 决定。

图 2.8-14 所示,画出了开路传输线沿线输入阻抗 $Z_{i\infty}$ 随 l 周期变化的曲线。

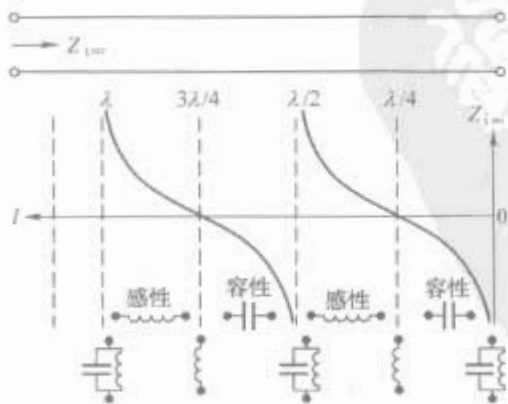


图 2.8-14 无损耗开路传输线的输入阻抗图

2.8.2.3 短路传输线

当 $Z_L = 0$ 时, Z_i 变为 Z_0 ,由式 (2.8-23) 可得

$$\dot{Z}_0 = j\dot{Z}_c \tan \beta l$$

(2.8-25)

如图 2.8-15 所示,式 (2.8-25) 表明:

- (1) 无损耗短路传输线的输入阻抗是纯电抗的。
- (2) $\tan \beta l$ 既可为正,也可为负,短路线输入阻抗呈容性还是感性,具体由 $\beta l (= 2\pi l/\lambda)$ 来决定,每隔 $\pi/4$ 就在感性到容性之间转换一次。

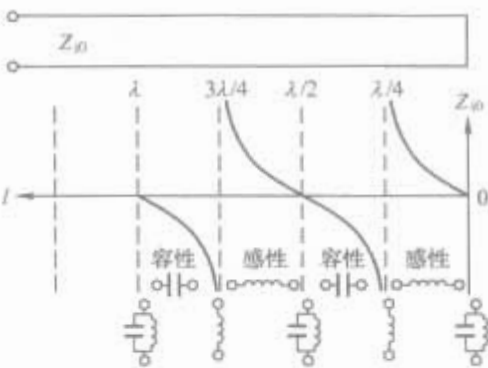


图 2.8-15 无损耗短路传输线的输入阻抗

- (3) $\lambda/4$ 短路线谐振时的开路效应会破坏屏蔽的连续性,这是结构设计中缝隙处理时必须重视的原理性问题。

2.8.2.4 传输线上的驻波

如果传输线终端的负载阻抗与传输线特性阻抗不相等,则传输线终端的不连续性会引起电压和电流的反射。这时入射波(从源端传出)和反射波(从负载传出)在线上将同时存在,两者在传输线上按时空关系代数合成,结果形成有别于行波的另一种波——驻波。

如图 2.8-16 所示,利用矢量相加的办法显示了传输线上存在反射波时沿线的电压幅度变化规律。幅度最大处称为波腹,幅度最小处称为波节,波节(或波腹)的位置与传输线负载特性有关。

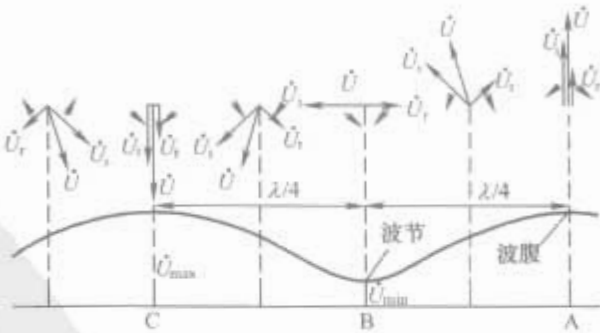


图 2.8-16 沿传输线的电压驻波分布规律

电压驻波的波腹与波节之间在空间上相距 $\lambda/4$,即电流驻波的波腹与电压驻波的波节重合。电流驻波瞬时值的时间相位也与电压驻波瞬时值相位相差 $\lambda/2$,表示传输线的驻波能量实际上以电场储能与磁场储能的形式在线上往复振荡。

图 2.8-17 所示,既有向终端电阻传输能量的行波,又有传输线自身分布参数 L_0 及 C_0 中储能交换过程引起的驻波。

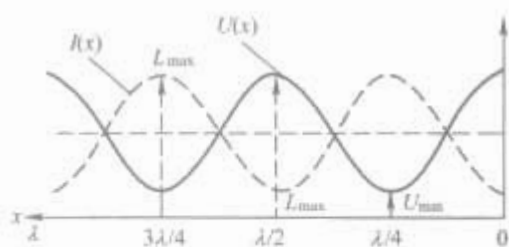


图 2.8-17 终端接电阻性负载 ($Z_L > Z_c$)

图 2.8-18 画出了无损耗传输线终端短路时沿线电压和电流的纯驻波。

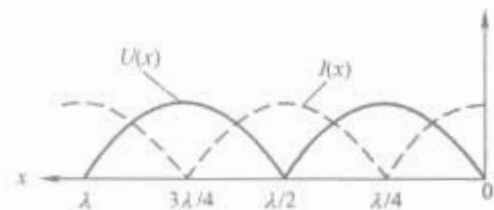


图 2.8-18 终端短路的纯驻波

2.8.2.5 反射

(1) 反射系数。负载端的反射系数定义为反射波与入射波之比，它与负载阻抗及传输线特性阻抗有关。

$$\dot{\rho} = \frac{\dot{Z}_L - \dot{Z}_c}{\dot{Z}_L + \dot{Z}_c} \quad (2.8-26)$$

由式 (2.8-26) 可知：

1) 终端开路的传输线， $Z_L \rightarrow \infty$ ， $|\dot{\rho}| = +1$ ，表示开路传输线在终端产生同相全反射。

2) 终端短路的传输线， $Z_L \rightarrow 0$ ， $|\dot{\rho}| = -1$ ，表示短路传输线在终端产生反相全反射。

3) 终端匹配的传输线， $Z_L = Z_c$ ， $|\dot{\rho}| = 0$ ，表示匹配传输线在终端不存在反射。

工程上用网络分析仪测反射特性通常以回波损耗 L_R 来表示，它与 $\dot{\rho}$ 的关系为

$$L_R = -20 \lg |\dot{\rho}| \quad (2.8-27)$$

(2) 电压驻波比。通常将有限长度的加载传输线上沿线电压驻波的最大值与最小值之比称为电压驻波比，电压驻波比 S

$$S = \frac{1 + |\dot{\rho}|}{1 - |\dot{\rho}|} \quad (2.8-28)$$

当 Z_L 和 Z_c 为纯电阻时，式 (2.8-28) 可变为

$$S = Z_L / Z_c$$

当 $Z_L > Z_c$ 时， $S = Z_L / Z_c$

当 $Z_L < Z_c$ 时， $S = Z_c / Z_L$

在传输线特性阻抗已知的情况下，可测量驻波比 S 直接求得终端负载 Z_L 的值。

3 基本方法与手段

3.1 屏蔽

屏蔽技术用来抑制电磁噪声沿着空间的传播，即切断辐射电磁噪声的传输途径。用电磁屏蔽的方法来解决电磁干扰问题最大的好处是不会影响电路的正常工作，因此不需对电路作任何修改。通常用金属材料或磁性材料把所需要屏蔽的区域包围起来，使屏蔽体内外“场”相互隔离。人们把阻止干扰源对外产生辐射而采取的屏蔽，称为主动屏蔽；把防止敏感设备免受外界辐射场的干扰而采取的屏蔽，叫被动屏蔽。

传播的“场”可分为近场和远场。近场又包含电场和磁场。远场通常以电磁场形式来分析。当噪声源是高电压小电流时，其辐射场主要表现为电场；当噪声源具有低电压大电流特性时，其辐射场主要表现为磁场。

对于电场、磁场、电磁场等不同的辐射场，由于屏蔽机理不同，因此采用的方法也不尽相同。

3.1.1 电场屏蔽原理

分析屏蔽机理，采用电路理论较为方便，如图 2.8-19 所示。

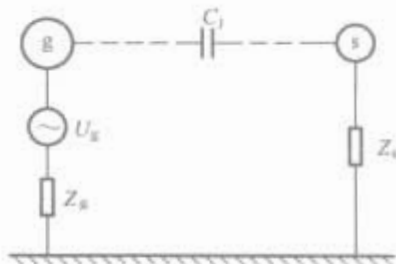


图 2.8-19 交变电场的耦合

有两个导体 g 和 s 置于大地上方，假设导体 g 上对地有一交变电压 \dot{U}_g ，会使其附近的另一导体 s 产生感应电压 \dot{U}_s 。设导体 g 和 s 之间的耦合电容为 C_1 ，导体 g 对地阻抗为 Z_g ，导体 s 对地阻抗 Z_s ，则可根据电路理论计算出导体 g 上的电压 \dot{U}_g 通过 C_1 电容在导体 s 上产生的干扰电压 \dot{U}_s 。

$$\dot{U}_s = \frac{j\omega C_1 Z_s}{1 + j\omega C_1 (Z_g + Z_s)} \dot{U}_g \quad (2.8-29)$$

在频率很低时，式 (2.8-29) 可写成

$$\dot{U}_s = j\omega C_1 Z_s \dot{U}_g \quad (2.8-30)$$

由式 (2.8-30) 可知：干扰电压与耦合电容的大小成正比，耦合电容越大，干扰就越强。

在导体 g 和 s 之间插入一金属板，假设 g 与金属板间的耦合电容为 C_1 ，金属板与导体 s 之间的耦合电容为 C_2 ，导体 g 和 s 之间的耦合电容为 C_3 。金属板对地阻抗为 Z_1 ，如图 2.8-20 所示。

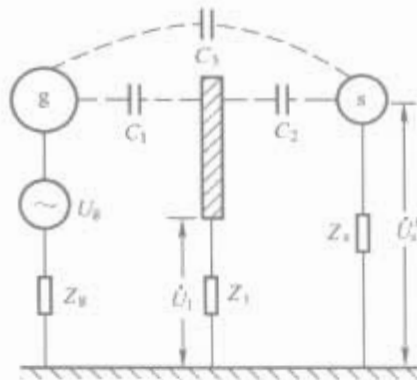


图 2.8-20 金属板的电场屏蔽

由于 C_1 、 $C_2 \gg C_3$ ，因此，可以忽略 C_3 ，金属板上感应的干扰电压为

$$\dot{U}_1 = \frac{j\omega C_1 Z_1}{1 + j\omega C_1 (Z_g + Z_1)} \dot{U}_g \quad (2.8-31)$$

导体 s 上感应到的干扰电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= \frac{j\omega C_2 Z_s}{1 + j\omega C_2 (Z_1 + Z_s)} \dot{U}_1 \\ &= \frac{j\omega C_2 Z_s}{1 + j\omega C_2 (Z_1 + Z_s)} \times \frac{j\omega C_1 Z_1}{1 + j\omega C_1 (Z_g + Z_1)} \dot{U}_g \end{aligned} \quad (2.8-32)$$

当 $Z_1 = 0$ ，即金属板接地时， $U_1 = 0$ ，从而 $U_s = 0$ 。

这表明金属板接地切断了导体 g 的辐射电场对导体 s 的

干扰途径,金属板起到了电场屏蔽作用。值得注意的是,良好的接地是金属板产生电场屏蔽的先决条件。如果不接地或接地不良,则可能产生比没有插入金属板的干扰更严重。电场屏蔽设计要求:

(1) 屏蔽体必须良好接地。一般要求屏蔽体与地连接电阻小于 $2\text{m}\Omega$ 。所以必须使用多对接插孔并联以减小接地阻抗,接地导线其横截面及其周界都应适当大些,且尽量缩短导线的长度,以减小导线的感抗。同时,为了使接地稳定可靠,对接地点的腐蚀问题应予以充分注意。

(2) 正确选择接地点。在电路布局和地线设置时,应避免低电平电路的地线中流过其他电路的且数值较大的地电流,原因是地线存在阻抗,会产生电位差。

(3) 合理设计屏蔽体的形状。由图 2.8-20 可知: C_1 越大, \dot{U}_1 就越大,说明干扰就越严重。减小 C_1 , 就能提高屏蔽效能。因此,盒形屏蔽比板状的要好,全密封的优于开孔和缝隙的。为获得高屏蔽效能,就要尽量缩小开孔尺寸及减少开孔数量。

(4) 注意屏蔽材料的选择。电场屏蔽分析常常把屏蔽体当作理想导体,实际屏蔽体是具有一定阻抗的。屏蔽体自身阻抗越大,其屏蔽效能就越差。故屏蔽体应选用良导体,如铜、铝、钢等。高频时,屏蔽体表面应镀银,以提高屏蔽效能。对电场屏蔽体的厚度,理论上没有明确要求,但必须满足加工工艺的要求。

3.1.2 磁场屏蔽的原理

3.1.2.1 低频磁场屏蔽的原理

当线圈中通过电流时,线圈周围存在磁场,磁力线是闭合的,且磁力线分布在空间,有可能对附近的敏感设备产生干扰。在磁场频率较低时(100kHz 以下),常采用铁磁性材料(如铁、硅钢片、坡莫合金等)进行磁场屏蔽。根据磁路定律可知,主磁路中的磁通

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{NI}{l/\mu S} = \frac{NI\mu S}{l} \quad (2.8-33)$$

式中: Φ 为磁通; F_m 为磁通势; I 为线圈中的电流; N 为线圈匝数; R_m 为磁阻; l 为磁路长度; S 为磁路截面积; μ 为磁导率。

从式(2.8-33)可知: μ 越高、 S 越大,则 R_m 越小,集中在磁路中的磁通就越大,在空气中的漏磁通就会大大减少。因此,铁磁材料起到磁场屏蔽作用,其实质是对干扰源的磁力线进行集中分流,从而保证屏蔽区域不受外磁场的影响。

在低频情况下,单层铁磁材料的屏蔽效能可表示为

$$SE_H = 20\lg\{0.22\mu_r[1 - (1 - t/r)^3]\} \quad (\text{dB}) \quad (2.8-34)$$

式中: SE_H 为磁场屏蔽效能; μ_r 为相对磁导率; t 为屏蔽体厚度; r 为同屏蔽体同容积的等效半径。

由式(2.8-34)可知:

(1) 单层铁磁材料的磁场屏蔽效能最大不超过 $20\lg(0.22\mu_r)$, 铁磁材料的磁导率越大,屏蔽效能越高。

(2) 增加屏蔽层厚度,也会加大屏蔽效能,但增加屏蔽层的厚度并不经济,最好采用多层屏蔽的方法。适用于低频磁场的方法在高频时并不适用,主要原因是铁磁材料的磁导率随频率的升高而下降,从而使屏蔽效能变坏;同时,高频时铁磁材料的铁损增加,相当于增加了被屏蔽线圈的电阻值,造成线圈品质因数数值大大下降。因此,利用铁磁性材料的高磁导率特性来集中分流干扰磁力线的方法只适用于

100kHz 以下的低频场屏蔽。

3.1.2.2 高频磁场屏蔽

高频磁场屏蔽材料采用金属良导体,如铜、钢、铝等。当高频磁场穿过金属时,金属板上产生感应电动势,由于金属板的电导率很高,产生的涡流很大,涡流产生反磁场,与穿过金属板的原磁场相互抵消,从而起到屏蔽的效果。

如果做一个金属盒把一线圈包围起来,则线圈电流产生的高频磁场在金属内壁产生涡流,从而把原磁场限制在盒内,不至于向外泄漏,起到了主动屏蔽的作用。金属盒外的高频磁场同样由于涡流作用只能绕过金属盒,而不能进入盒内,起到了被动屏蔽的作用。

金属盒的高频磁场屏蔽效能与高频磁场在盒体上产生的涡流大小有关。线圈和金属盒的关系可以看成是变压器,线圈视为变压器的一次线圈,金属盒视为一匝短路线圈,作为变压器的二次侧,如图 2.8-21 所示。根据变压器的原理,盒上涡流可表示为

$$i_s = \frac{j\omega Mi}{jL_s\omega + r_s} \quad (2.8-35)$$

式中: i_s 为金属盒上的涡流; M 为线圈与金属盒之间的互感; i 为线圈上的电流; L_s 为金属盒的电感; r_s 为金属盒的电阻。

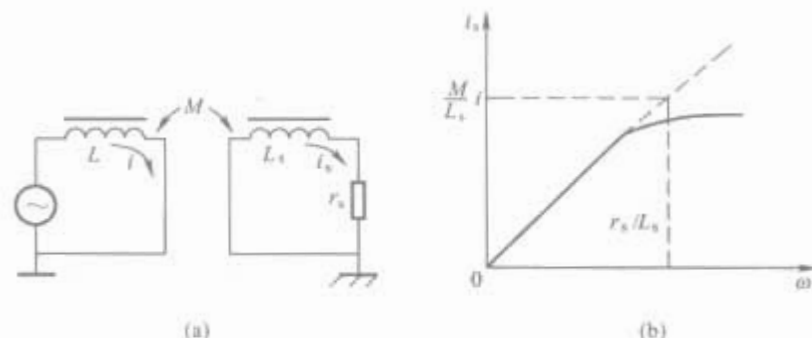


图 2.8-21 金属屏蔽盒的等效电路及计算

(a) 屏蔽线圈等效电路; (b) 涡流和频率的关系

当频率较高时,由式(2.8-35)可得

$$i_s \approx M/L_s i \quad (2.8-36)$$

当频率较低时,由式(2.8-35)可得

$$i_s \approx \frac{j\omega M}{r_s} i \quad (2.8-37)$$

由式(2.8-37)可得到如下结论:

(1) 由图 2.8-21(b)所示,在低频时涡流很小,涡流产生的反磁场不足以完全排斥原干扰磁场。因此,此种方法不适用于低频磁场屏蔽,随着频率升高,涡流增大,到一定频率后涡流不再随着频率升高,说明在高频情况下盒上的涡流产生的反磁场已足以排斥原有的干扰磁场,从而起到屏蔽作用。

(2) r_s 越小,产生的涡流越大,屏蔽效果越好,故高频磁场屏蔽材料应该用导电性能强的良导体。

(3) 由于高频电流具有集肤效应,涡流只在金属表面的薄层中流过,故金属屏蔽体无须像低频磁场那样采用很厚的材料,很薄一层金属良导体就能起到良好的高频磁场屏蔽作用。

3.1.2.3 磁屏蔽的结构

对于低频磁场,在使用铁磁性材料做屏蔽壳体时,如要在壳体上开缝,则一定要注意开缝的方向,图 2.8-22 所示为磁屏蔽体上的开缝。

在壳体上磁力线是垂流动的,横向缝隙会阻挡磁力线,使磁阻增加,从而使屏蔽性能变坏;纵向缝隙不会阻挡

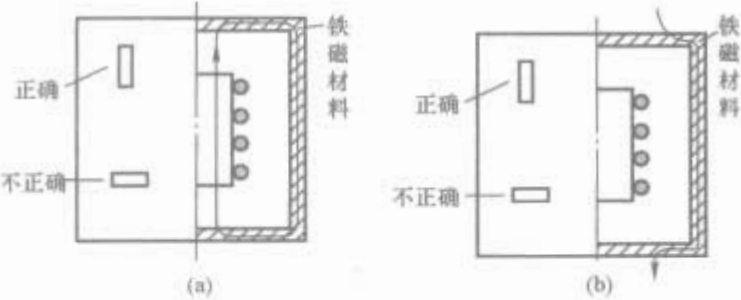


图 2.8-22 磁屏蔽体的开缝
(a) 主动屏蔽；(b) 被动屏蔽

磁力线，但应注意开缝不能太宽。
对于高频磁场，如果要在屏蔽盒上开缝，则缝的方向必须顺着涡流方向，并且缝和宽度要尽可能地小，如开缝切断涡流的通路，则将大大影响金属盒的屏蔽效果，如图 2.8-23 所示。

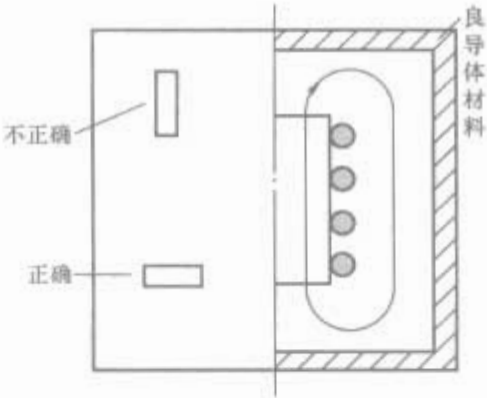


图 2.8-23 高频磁场的主动屏蔽

对磁场的屏蔽，屏蔽体无须接地，但在实际使用中，金属屏蔽体都要求接地，因为这样既可屏蔽高频磁场又能屏蔽电场。

3.1.3 电磁场屏蔽

电磁场屏蔽用于抑制噪声源和敏感设备距离较远时通过电磁场耦合产生的干扰。电磁场屏蔽必须同时屏蔽电场和磁场，常采用电阻率小的良导体材料。空间电磁波在入射到金属体表面时会产生反射和吸收，电磁能量被大大衰减，从而起到屏蔽的作用。

3.1.3.1 吸收损耗

电磁波在金属体中以指数方式很快衰减，传输距离很短。电磁波在金属体中的传输衰减规律可表示为

$$\begin{aligned} E_t &= E_0 e^{-t/\delta} \\ H_t &= H_0 e^{-t/\delta} \end{aligned} \tag{2.8-38}$$

式中： E_0 和 H_0 为电磁场波入射到金属表面时的电场强度和磁场强度； E_t 和 H_t 为电磁波入射到金属体内部的电场强度和磁场强度； t 为电磁波深入到金属体内的距离； δ 为集肤深度。

集肤深度与频率和材料性能有关，可表示为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \tag{2.8-39}$$

式中： f 为频率，Hz； μ 为金属体的磁导率， $\mu = \mu_0 \mu_r$ ， μ_r 为相对磁导率， μ_0 为自由空间磁导率； σ 为金属体的电导率， $\sigma = \sigma_0 \sigma_r$ ， σ_0 为铜的电导率， σ_r 为金属相对于铜的电导率。

吸收损耗常表示为

$$A = 1.31 t \sqrt{\mu_r \sigma_r f}$$

式中： t 为金属体的厚度。

4 种不同材料的 μ_r 和 σ_r 见表 2.8-4。

表 2.8-4 4 种材料的 μ_r 和 σ_r

参数	铜	铁	白铁皮	坡莫合金
σ_r	1	0.17	0.15	0.04
μ_r	1	500	1	10^4

图 2.8-24 给出了不同材料不同厚度金属体的吸收损耗。由图 2.8-24 可知：金属体越厚，吸收损耗越大；吸收损耗随频率升高而增加；铁磁性材料如铁、坡莫合金的吸收损耗大于良导体。

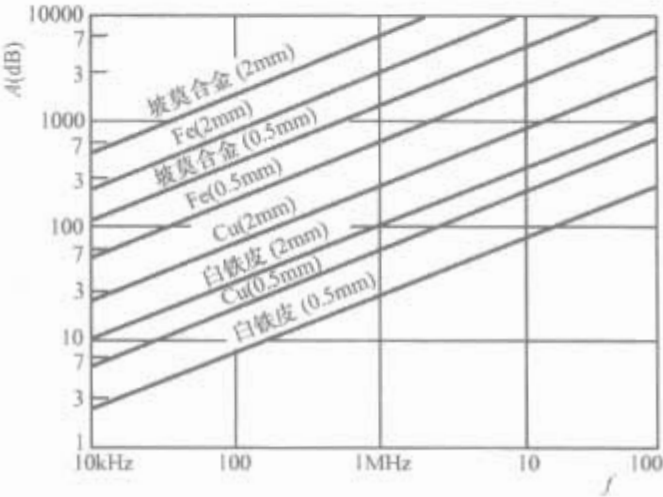


图 2.8-24 不同材料不同厚度金属体的吸收损耗

3.1.3.2 反射损耗

由于电磁波在空气介质和在金属体中的波阻抗不一致，故当电磁波到达两种介质的分界面时，因阻抗不匹配而发生反射，由此引起的电磁波能量损耗称做反射损耗。

电磁波在金属中的波阻抗，可由下式计算

$$Z_l = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}} \tag{2.8-40}$$

电磁波在空气中的波阻抗由场的类型决定。对于远场，电磁波为平面波的情况，波阻抗为

$$Z_{op} = 377 \Omega$$

对于近场中的电场，波阻抗为

$$Z_{oE} = 8 \times 10^{-6} / fd$$

对于近场的磁场，波阻抗为

$$Z_{oH} = 8 \times 10^{-6} fd$$

因此，对于不同类型场，金属体的反射损耗可用下式表示

$$\left. \begin{aligned} \text{平面波} \quad R_p &= 168.7 + 10 \lg \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right) \\ \text{电场} \quad R_E &= 321.7 + 10 \lg \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 d^2} \right) \\ \text{磁场} \quad R_H &= 14.6 + 10 \lg \left(\frac{f d^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) \end{aligned} \right\} \tag{2.8-41}$$

式中： f 为电磁波的频率； μ_r 为金属材料的相对磁导率； σ_r 为金属材料的相对电导率； d 为干扰源到屏蔽体的距离。

从式 (2.8-41) 可以看出：

(1) 平面波的反射损耗与干扰源至屏蔽体的距离无关，而电场的反射损耗以 $20 \lg d$ 的速度下降，磁场的反射损耗以 $20 \lg d$ 的速率上升。

(2) 随着频率的升高，平面波的反射损耗以 $-10 \text{ dB}/10$ 倍频的速率下降，电场的反射损耗以 $-30 \text{ dB}/10$ 倍频的速率下降，而磁场的反射损耗以 $10 \text{ dB}/10$ 倍频的速率上升。

(3) 同一屏蔽材料，对不同类型的场反射损耗不一样，在频率不变条件下，一般有 $R_H < R_p < R_E$ 。

(4) 不同屏蔽材料的反射损耗不管场型如何只差一个常数, 即 $10\lg \frac{\sigma_r}{\mu_r}$ 。铁的反射损耗比铜要小得多。

一般情况下不考虑多重反射, 因此, 金属体总的屏蔽效能应为吸收损耗 A 和反射损耗 R 之和。总的屏蔽效能为

$$S_E = A + R \tag{2.8-42}$$

平面波
$$SE_p = 1.31t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} + 168 + 10\lg\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f}\right) \tag{2.8-43}$$

电场
$$SE_E = A + R_E$$

$$= 1.31t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} + 321.7 + 10\lg\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 d^2}\right) \tag{2.8-44}$$

磁场
$$SE_H = A + R_H$$

$$= 1.31t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} + 14.6 + 10\lg\left(\frac{fd^2\sigma_r}{\mu_r}\right) \tag{2.8-45}$$

从式 (2.8-43)、式 (2.8-44) 及式 (2.8-45) 可以得出以下几点重要结论:

- (1) 吸收曲线 A , 对于平面波, 电场和磁场都是相同的。
- (2) 由于反射损耗, 随频率不同而有所不同, 因此在使用式 (2.8-43) ~ 式 (2.8-45) 时, 必须考虑频率范围及干扰源与屏蔽体的距离 $d = \lambda/2\pi$ 的条件来确定近场和远场的临界频率 f_0 , 当 $f > f_0$ 时, 应按平面波公式计算; 当 $f < f_0$ 时, 如干扰源为电场, 则应使用电场式 (2.8-44) 来考虑; 如果是磁场, 则应使用式 (2.8-45) 来计算。
- (3) 频率越高, 屏蔽效能越好。高频时, 屏蔽效能主要为吸收损耗, 而低频时主要是反射损耗 R 起作用。
- (4) 高电导率、低磁导率的金属材料只适用于高频电磁场和低频电场的屏蔽, 而对于低频磁场只能采用高磁导率的铁磁性材料, 如铁、坡莫合金等来屏蔽。

3.1.4 屏蔽材料

机箱的屏蔽材料一般采用铜、铝、钢等, 厚度一般均为 0.2 ~ 0.8mm。这些金属板对电场、高频磁场和电磁场的屏蔽效能都很大, 可达 100dB 以上。表 2.8-5 ~ 表 2.8-7 给出了常用金属材料所做的屏蔽体的屏蔽效能。

表 2.8-5 均匀金属的屏蔽衰减 (厚度为 0.1mm) NP

f (kHz)	铜			铝			钢		
	A	R	S	A	R	S	A	R	S
20	0	2.06	2.06	0	1.56	1.56	0.1	0.45	0.55
60	0	3.16	3.16	0	2.64	2.64	0.55	0.96	1.51
100	0.01	3.65	3.66	0	3.15	3.15	0.96	1.1	2.06
150	0.03	4.04	4.07	0.01	3.54	3.55	1.37	1.22	2.59
1000	0.76	5.32	6.08	0.41	5.09	5.50	4.66	1.73	6.39
100000	14.49	4.86	19.35	10.9	6.9	17.8	60.9	3.86	64.76

表 2.8-6 各种金属及介质的波阻抗 (模值) $\times 10^{-3} \Omega$

f (Hz)	铜	钢	铝	空气介质			
				0.001m	0.01m	0.1m	1m
1×10^4	0.037	1.044	0.048	0.080	0.8	8	80
6×10^4	0.091	2.558	0.118	0.48	4.8	48	480
1×10^5	0.118	3.303	0.153	0.8	8	80	800
2×10^5	0.166	4.671	0.216	1.60	16.0	160	1600
5×10^5	0.263	7.385	0.341	40	40	400	4000
1×10^6	0.372	10.44	0.483	8	80	800	8000
1×10^7	1.18	33.03	1.53	80	800	8000	80000
1×10^8	3.72	104.43	4.826	800	8000	80000	800000
计算公式	$0.372 \times 10^{-6} \sqrt{f}$	$10.44 \times 10^{-6} \sqrt{f}$	$0.483 \times 10^{-6} \sqrt{f}$	$8 \times 10^{-6} fd$			

注 由于金属材料质量大, 价格贵, 现代电子设备广泛采用工程塑料做机箱。为使其具有屏蔽作用, 常在塑料中掺入高电导率的金属粉, 使之成为导电塑料, 或者在其表面喷涂一层导电薄膜层。

表 2.8-7 微机塑料机壳导电喷涂层屏蔽效能的实测值 dB

f (MHz)	屏蔽效能		f (MHz)	屏蔽效能	
	磁场	电场		磁场	电场
0.15	1.0	90	8.00	12.7	61
0.50	3.0	82	12.00	13.9	58
0.75	3.6	81	18.00	17.9	54
1.00	5.0	76	24.00	18.4	
2.00	7.0	71	30.00	20.8	49
4.00	6.7	64			

注 测试条件为发射采用直径为 100mm 的圆环天线, 与被测机壳平行放置在机壳内; 接收端采用电磁干扰测量仪的环状磁场天线, 与发射天线同轴放置于机壳的外面, 两者相距 200mm, 接收环与被测壳壁间距为 80mm。

3.1.5 屏蔽结构的完整性

以上讨论的是屏蔽体完整的条件下进行的。实际应用的机箱不可能是全密封的, 总有各式各样大大小小的孔、洞和缝隙。例如通风孔、进/出线孔、面板器件安装孔、机箱各板的连接缝、机箱盖和箱体之间的缝隙等。这些孔、缝都可能造成电磁波的严重泄漏。实际上, 场通过孔、缝时的损耗要比穿过金属体时的损耗要小得多, 故考虑机箱的屏蔽效能时主要应考虑孔、缝的屏蔽效能。

3.1.5.1 远场区孔、缝的屏蔽效能估算

当电磁波入射到一个缝隙、孔洞时, 其作用相当于一个偶极天线, 当缝隙的长度达到 $\lambda/2$ 的整数倍时, 其辐射效率最高 (与缝隙的宽度关系不大), 它可以将进入缝隙的全部能量都辐射出去。

对于一个厚度为0的材料的缝隙,可用下式估算

$$S = 100 - 20\lg L - 20\lg f + 20\lg[1 + 2.3\lg(L/H)]$$

式中: f 为入射电磁波频率, MHz; L 为缝隙长度, mm; H 为缝隙度宽, mm。

3.1.5.2 近场区孔、缝的屏蔽效能估算

在近场区,孔、缝的泄漏还与辐射源的特性有关,当辐射源为电场源时,孔洞的泄漏比远场时小;当辐射源是磁场时,孔、缝的泄漏比远场时要大。

孔、缝的电磁泄漏可用以下两个公式来近似估算

若 $Z_c > 7.9/fd$, 则

$$S = 48 + 20\lg Z_c - 20\lg[1 + 2.3\lg(L/H)] - 20\lg Lf \quad (2.8-46)$$

若 $Z_c < 7.9/fd$, 则

$$S = 20\lg(\pi d/L) + 20\lg[1 + 20\lg(L/H)] \quad (2.8-47)$$

式中: Z_c 为辐射源电路阻抗, Ω ; d 为孔、缝到辐射源的距离, m; L 和 H 分别为孔或缝的长及宽, mm; f 为入射电磁波的频率, MHz。

金属板的屏蔽作用主要是由吸收损耗和反射损耗产生的。反射损耗是因为空气中的波阻抗和金属中的波阻抗不匹配引起的,金属中的波阻抗与金属板上是否有孔、缝无关,孔、缝的存在并不会影响反射损耗。但金属体的吸收损耗是由于电磁波在金属体上引起感应,产生欧姆热损耗,同时涡流产生反向磁场抵消了原来的磁场,因此,能否保证涡流畅通无阻是保证吸收损耗的重要条件。实际应用中不可能预测涡流的方向,所以唯一的办法是尽量缩短缝隙的长度。对于固定的缝隙长度,频率越高,缝隙天线的二次发射越有效,泄漏就越严重,故一般要求缝隙长度应为

$$L < \lambda/10 \sim \lambda/100$$

式中: L 为缝隙长度; λ 为波长。

3.1.5.3 改善孔、缝屏蔽的方法

(1) 导电衬垫。导电衬垫具有良好的导电性和弹性,用于两块金属板的连接处,可减小缝隙,保持金属板之间的电连续性,从而增加屏蔽效能。

(2) 金属丝网。设备的通风口常覆盖一层金属丝网,使之既能保持通风又能起到屏蔽作用,金属网用于屏蔽要求不太高的场合,100MHz 以上屏蔽效能将下降。

(3) 截止波导管。截止波导管是一种金属管,对电磁波而言,它是一种高通滤波器,波导管具有确定的截止频率,当电磁波的频率低于该截止频率时,电磁波不能穿过波导管,因而起到屏蔽作用。

(4) 深度缝隙。根据电磁场理论,任何具有一定深度的孔缝都具有波导的性质,这可用来改善盖板和机箱间接缝的屏蔽。

图 2.8-25 为增加缝隙深度的结构。只要 b 足够长,就可以增加电磁波通过接缝时的衰减。

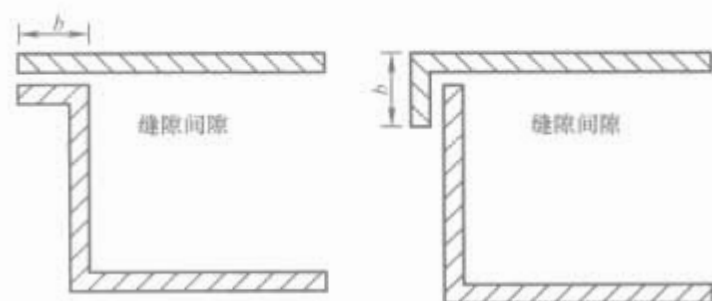


图 2.8-25 增加缝隙深度的结构

没有屏蔽设计经验的设计人员往往直接将电缆穿出屏蔽体。还有人将电缆通过金属管穿出屏蔽机箱,试图通过截止波导管来防止泄漏。

正确处理电缆穿出屏蔽体的方法有两种:① 将导线屏蔽起来,这相当于将屏蔽体延伸到导线端部;② 对导线进行滤波处理,滤除导线上的高频成分。在电缆端口上安装低通滤波器,可以有效滤除电缆上的干扰,保持屏蔽体的完整性,但前提是电缆上传输的信号频率,与要防护的干扰频率相差较远。采用滤波的方法时,滤波器的截止频率十分重要,不能影响正常信号的传输。

为防止电缆射频干扰,对屏蔽层的端接要求十分严格。

3.1.6.1 电缆的屏蔽

电缆屏蔽层的种类有金属丝编织层、软导管、金属硬管或可缠绕的高磁导率带条。其中金属丝编织层使用方便、质量小、成本低的一种屏蔽层,应用很广。编织层的屏蔽效能随编织密度的上升而增加,随频率的升高而下降。

电缆屏蔽层的屏蔽效能既与屏蔽层材料、编织密度等因素有关,也与电缆屏蔽层的接地方式及终端负载及入射信号源的阻抗等因素有关。

3.1.6.2 电缆连接器的屏蔽

电缆连接器分为高频电缆插头座和低频电缆插头座。从高频同轴连接器的屏蔽性能来说,螺纹连接式比卡扣式的为好,在屏蔽要求较高的场合,优选螺纹式连接器。

屏蔽电缆连接器的使用应遵循以下 3 点:

(1) 连接器的结构应确保在各种规定的环境条件下工作时的屏蔽效能。

(2) 两连接器对接部分的连接器屏蔽层,在配对插针相互接触之前,必须已真正接通;反之,应一直保持到配对插针分开以后脱离,电缆屏蔽层最好与连接器作 360° 的连接。

(3) 连接器配合部分的插针应有足够的电气绝缘,以保证在插针未插入插座之前,现场工作人员不会因偶然碰到插针或插座而遭到电击。

3.2 滤波

3.2.1 滤波器的作用及原理

任何直接穿透屏蔽体的导线都会造成屏蔽体的失效。解决的方法之一就是增加滤波器,以滤除不必要的频谱成分,减小电缆产生的电磁辐射,也可防止电缆上感应到的环境噪声传进设备内的电路。

滤波器的作用简单来说就是切断干扰沿信号线或电源线传播的路径,与屏蔽体共同构成完善的干扰防护。概括地说,滤波器的作用是仅允许工作必需的信号频率通过,而对工作不需的信号频率有很大的衰减作用,这样就使产生干扰的机会减为最小。

电缆上的干扰电流按其流动路径可分为共模干扰电流和差模干扰电流两种。由于对这两种干扰电流的滤波方法不相同,因此在进行滤波设计之前,必须了解所面对的干扰电流的种类。

3.2.1.1 共模干扰电流

干扰电流在电缆中的所有导线上相位相同,它在电缆与大地之间形成的回路中流动。产生共模干扰电流的原因有 3 点:

(1) 外界电磁场在电缆中所有导线上感应出来的电压而产生的电流。

(2) 由于电缆两端设备所接的地电位不同而产生的电流。

3.1.6 屏蔽体上电缆的处理与选择

穿过屏蔽体的电缆对屏蔽体的破坏是十分严重的,许多

(3) 设备上的电缆与大地之间存在电位差,也会产生共模干扰电流。

共模干扰电流本身并不对电路产生影响,只有当共模电流转变为差模电流时,才会对电路产生影响。另外,如果设备在其电缆上产生共模干扰电流,则电缆会产生强烈的电磁辐射,造成设备不能满足电磁兼容的标准要求或对其他设备造成干扰。估算干扰的常用公式为

$$E=1.26fIL/d \tag{2.8-48}$$

式中: f 为电缆中的干扰频率; I 为电缆中的共模干扰电流; L 为电缆的长度; d 为测量距离。

3.2.1.2 差模干扰电流

干扰电流在信号线与信号地线之间流动,差模干扰电流是由外界电磁场在信号线和信号地线构成的回路中感应出来的。常用下列公式来进行粗略评估

$$E=2.6IfA^2/d \tag{2.8-49}$$

式中: A 为回路面积; f 为回路中的工作频率; I 为差模电流; d 为测量距离。

总而言之,滤波器是由电感、电容、电阻或铁氧体器件构成的频率选择性的二端网络,插入传输线中,抑制不需要的频率传播。

3.2.2 滤波器的选择

根据要滤除的干扰信号的频率与工作频率的相对关系,干扰滤波器有低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器及带阻滤波器等。

电磁干扰滤波器与普通滤波器相比具有下列特点:

- (1) 电源系统的阻抗与干扰源的阻抗值变化范围较大,很难得到一个可供设计用的恒定值。因此,使用在电源线上的电磁干扰滤波器常在阻抗失配状态下工作。
- (2) 电磁干扰频谱很宽,滤波器元件在这个频率范围内高频特性显得十分复杂,难以用元件的等效集中参数来表示滤波器的高频特性。
- (3) 电磁干扰滤波器对传输的有用信号或电源工作电流的损耗应降低到最低程度。
- (4) 电磁干扰滤波器在阻带范围内应有足够衰减量,把传导干扰电平抑制到规定的范围内。选择使用滤波器必须考虑下列特性:插入损耗、频率特性、阻抗、额定电压、额定电流、体积、质量、温升、漏电流及可靠性等。

低通滤波器在电磁干扰抑制中使用最多。常用的低通滤波器有RC和LC两种。无论哪种滤波器,电容并联在要滤波的信号与地线之间、信号与机壳地或大地之间,而电阻或电感则串联在要滤波的信号线上。

低通滤波器的类型如图2.8-26所示。

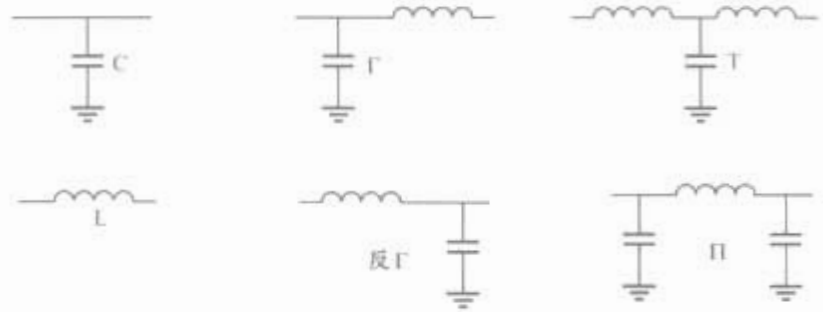


图 2.8-26 低通滤波器的类型

图2.8-26中,滤波器件越多,滤波器阻带的衰减越大,而滤波器通带与阻带之间的过渡就越短。不同结构的滤波器电路适合于不同的源阻抗和负载阻抗,它们的关系见表2.8-8。

表 2.8-8 电路适用场合的选择

负载阻抗	适应电路	源阻抗
高	C、Π、多级Π	高
高	Γ、多级Γ	低
低	反Γ、多级反Γ	高
低	L、T、多级T	低

实际电路的阻抗很难估算;尤其是在高频时,由于电路寄生参数的影响,电路的阻抗变化,且电路的阻抗往往还与电路的工作状态有关,再加上电路阻抗在不同的频率上也不一样。因此,在实际中,哪一种滤波器有效主要依靠试验结果来确定。

3.2.3 电源线上的滤波器

电源线滤波器的基本电路如图2.8-27所示。

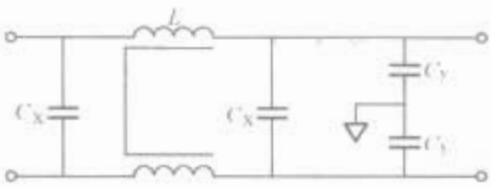


图 2.8-27 电源线滤波器的基本电路

图2.8-27中各器件的作用: C_x 为差模滤波电容,对差模电流起旁路作用,电容值一般为 $0.1\sim 1\mu\text{F}$; C_y 为共模滤波电容,对共模电流起旁路的作用,一般此电容值不大,在 $0.01\mu\text{F}$ 以下,主要是考虑安全标准中漏电电流的限制要求所为; L 为共模滤波电感,其主要作用是滤除低频共模干扰。而在高频时,由于寄生电容的存在,对干扰的抑制作用已经不明显,主要依靠共模滤波电容。

基本电路对干扰的滤波效果很有限,仅用于要求不高的场合。如要提高滤波器的效果,可在基本电路的基础上,增加一些器件即可。

电源线滤波器高频特性差的主要原因有两个:①内部寄生参数造成的空间耦合;②滤波器件的不理想。因此,改善高频性能也应从这两方面着手。滤波器的安装品质对实际衰减特性影响很大,只有在滤波器正确安装到位后,才能获得预期的效果,电源滤波器的安装应遵循如下原则:

- (1) 电源供电线的滤波器应安装在设备或屏蔽壳体的电源入口处,并予以屏蔽。屏蔽体应与设备壳体良好搭接。
- (2) 严禁将滤波器的输入/输出线靠得太近。
- (3) 滤波器的金属外壳一定要大面积地贴在金属机箱的导电表面上,当滤波器的外壳为塑料时,就必须通过接地端子接地,但一定要注意接地线必须短而粗。
- (4) 对塑料外壳的机箱,建议增加金属参考接地平面,供滤波器接地使用。

3.2.4 信号线上滤波器

信号滤波器的主要作用是滤除信号线端口上的干扰电流,既防止设备内的噪声电流传导到信号线上,借助信号线的天线效应产生辐射;同时也能防止外界干扰在信号线上的感应噪声传入设备内部,因此,为了满足电磁兼容的一般要求,非屏蔽信号线的端口上必须安装滤波器。

3.2.4.1 常用的信号滤波器

常用的信号滤波器如图2.8-28所示。

3.2.4.2 信号滤波器使用注意事项

信号滤波器一般用于信号线的滤波,在许多场合,信号线上传送的信号以微弱模拟信号及脉冲数字信号为主。当滤波过强时,可使模拟信号衰减严重,或使脉冲信号波形严重

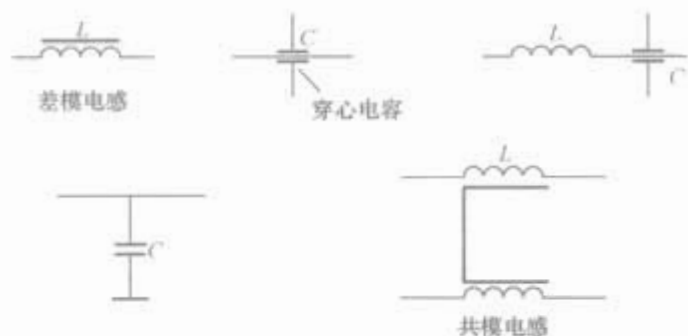


图 2.8-28 常用的信号滤波器

变形而无法识别。另外，必须考虑结构的耐压要求，尤其是对地之间的电容的耐压要求。因此，信号滤波器的滤波作用不会太强，不能将所有希望都寄托于滤波器上。

3.2.4.3 信号滤波的安装

信号滤波器一般置于信号线与屏蔽机箱的出口端根部，有些连接器直接带有低通滤波器。信号滤波器也常安装于线路上。这种安装的优点是经济，但缺点是：

- (1) 滤波器的输入、输出之间没有隔离，易发生耦合。
- (2) 接地阻抗不是很低，削弱了高频旁路效果。
- (3) 滤波器与机箱之间的一段连线会产生不良作用。

3.2.5 磁心材料的选择

吸收式滤波器是由有耗器件构成的，在阻带内将吸收噪声和能量转化为热损耗，从而起到滤波作用。铁氧体吸收型滤波器是应用发展很快的一种低通滤波器，已广泛应用于各种电路中。铁氧体是一种磁性材料，由铁、镍、锌、氧化物混合而成，具有很高的电阻率，较高的磁导率（约为 $100\sim1500\text{H/m}$ ）。当导线中的电流穿过铁氧体时，低频电流可几乎无衰减地通过，而高频电流则会产生很大的损耗，并转变为热量而消耗掉，故铁氧体和穿过其中的导线即可成为吸收式低通滤波器。其等效电路可表示为

$$Z(f) = R(f) + jX(f)$$

式中： $X(f) = \omega L(f)$ 。

导线穿过铁氧体磁心构成的电感的阻抗虽在形式上是随着频率的升高而增加，但在不同频率上，其机理是完全不同的。低频时，阻抗由电感的感抗构成， $X>R$ ，电感量较大，起主导作用；高频时， $R>X$ ，这时电阻起主导作用，并且电阻随频率升高增加，而电感却下降。

对于直流和低频信号，滤波器的阻值很低，直流电阻只有零点几欧，故几乎无衰减，可顺利通过；而对于几兆赫到几百兆赫的高频信号滤波器的阻抗则成百倍地增加，因此对高频信号起到较大的衰减作用。由于铁氧体滤波器在高频时电阻值大于感抗，主要呈现电阻性，相当于一个品质因数很低电感器，故能在相当宽的频率范围内保持较高的阻抗，从而提高了高频滤波性能，如图 2.8-29 所示。

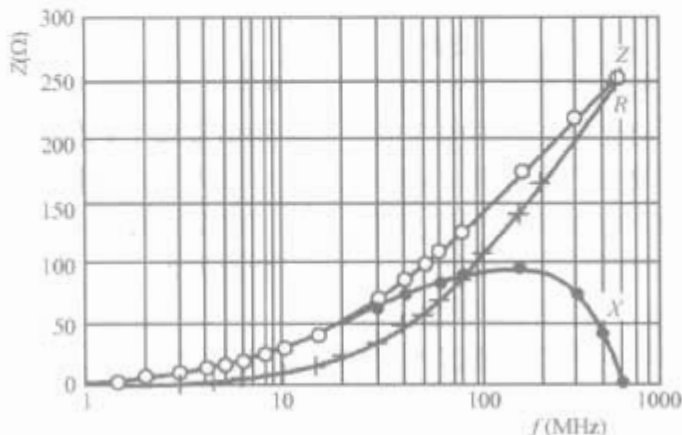


图 2.8-29 铁氧体低通滤波器的阻抗

使用铁氧体磁环时应注意以下问题：

(1) 电缆或导线应与环内径密贴，不要留太大的间隙，这样导线上电流产生的磁通可基本上都集中于磁环内，从而增加滤波效果。

(2) 磁环越长，越厚，阻抗就越大。

(3) 有时为增加阻抗可将导线在环上绕上 2 圈，但不宜过多。这是由于匝间存在分布电容，高频时实际增加的阻抗不能达到预期的目的，因此一般最多绕 2~3 匝。

(4) 磁环（磁珠）内的导线流过的电流强度较大时，会使其滤波作用失效，这是因为铁氧体磁环与其他电感铁心相比容易产生磁饱和，磁导率急剧下降，阻抗也随之下降。在选择使用铁氧体时必须注意这一点。

(5) 如果使用铁氧体磁环或磁珠的线路负载阻抗已很高，则磁珠所起作用有限。因为磁珠的阻抗在几百兆赫时也只有不足 300Ω ，所以磁珠比较适用于低阻抗回路。如果能在磁珠后再并接一个电容组成类似 LC 滤波器，则会大大降低负载阻抗，从而增加滤波效果。

总之，铁氧体磁珠与电感器的功能相同，都是对高频产生高阻抗，只是磁珠是吸收性的，而电感是反射性的，磁珠的高频滤波性能比电感器好。磁珠与磁环可应用于以下场合：

(1) 磁环（磁珠）可套于交流电源线对、直流电源线对及信号线对上，也可套在电缆线把上用于抑制共模噪声。

(2) 磁环（磁珠）可套在高频元件引脚上，防止电路产生高频振荡。

(3) 磁环（磁珠）可串接在电源的正负导线中用于抑制差模噪声。

3.3 接地与搭接

3.3.1 接地的目的

在电子设备中，接地是抑制电磁噪声和防止干扰的重要手段。如果在设计时能将接地与屏蔽巧妙地配合使用，则对实现电子设备的电磁兼容性将起到事半功倍的效果。

所谓“地”，即信号流回源的低阻抗路径。地线是电路中的电位参考，它为系统中的所有电路提供一个电位基准。电子设备接地的目的如下：

(1) 提高电子设备电路系统工作的稳定性。电子设备若不与大地相连，它相对于大地将呈现一定的电位，该电位会在外界干扰场强的作用下变化，从而导致电路系统工作的不稳定；如果与大地相连，则使它处于真正的零电位，从而有效地抑制干扰。

(2) 泄放机箱或机柜上的积累静电电荷，避免静电高压导致设备内部放电造成的干扰。

(3) 为设备操作人员提供安全保障。

3.3.2 单点和多点接地

3.3.2.1 单点接地

单点接地就是把整个电路系统中某一点作为参考地基准，其他各单元的信号地都连接到这一点上。

(1) 单点接地的形式。根据单点接地的不同形式，可分为并联单点接地及串联单点接地，如图 2.8-30 所示。

(2) 单点接地的适用性。单点接地形式最简单、最方便，缺点是地线太长。当频率升高时，一方面增加了地线阻抗，容易产生共地阻抗干扰，特别是当地线长度为 $\lambda/4$ 的奇数倍时，根据传输线理论，接地点相当于开路，此时地线变成了向外辐射的天线；另一方面，随着频率的升高，使地线之间，地线与其他导线之间由于电容耦合或电感耦合产生的

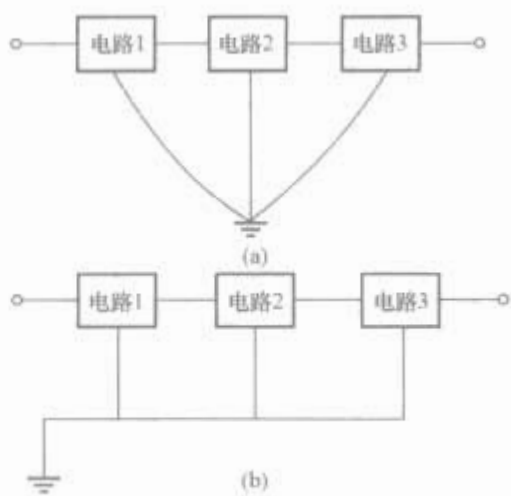


图 2.8-30 单点接地
(a) 并联单点接地；(b) 串联单点接地

相互干扰会大大增加。因此，单点接地方式只适用于低频电路，在 1MHz 以下可采用此法。在 1~10MHz 之间，当地线的长度不超过地线中高频电流波长的 1/20 时，也可采用单点接地。较长的地线应尽量减小其阻抗，特别是减小电感。可采用增加矩形截面导体来替代圆导体当作地线带，还可采用接地母排等。串联单点接地虽十分简单，但在大功率和小功率电路混合系统中，切忌使用，因为大功率电路中的地线电流会影响到小功率电路甚至控制电路的正常工作，它所带来的公共阻抗耦合干扰常常令人棘手。

3.3.2.2 多点接地

多点接地的思路是把需要接地的电路就近接到一金属面板上，各电路接点到金属面的引线要尽可能地缩短。金属面板要具有导电性能好，面积大，本身阻抗极低且不易产生阻抗干扰。

当高频工作电路的频率大于 10MHz 时，采用多点接地。在 1~10MHz 之间，当地线长度超过地线中高频电流波长的 1/20 时，也要采用多点接地。

多点接地系统的优点是电路构成比单点接地简单，接地线上出现高频驻波现象的可能性大大减少。但采用多点接地后设备内部会增加许多地线回路，特别是当两接地点存在较大电位差时，有可能产生地环路电流，导致系统工作不正常。

3.3.3 地环路干扰及抑制

地环路是指电路多点接地且电路间有信号联系时构成的电路，叫地环路，如 2.8-31 所示。在图 2.8-31(a)中，由于 A、B 之间存在电位差 U_{AB} ，或由于外界电磁场较强，在地环路 ABCD 中产生感应电动势 U_{AB} ， U_{AB} 将叠加于有用信号 E_s 上，一起加到负载 Z_1 上，从而产生干扰，这种干扰称为差模干扰。在图 2.8-31(b)中， U_{AB} 将同时加到两根导线上，由于这 2 根导线阻抗不对称，故 U_{AB} 在两根导线上产生的共模电流大小不等，最后在负载 Z_1 两端产生差模电压，从而影响到电路 2 的正常工作，这是共模干扰。共模干扰只有在转化为差模干扰后，才能产生干扰影响。

在机电一体化系统中，必须特别关注地环路引起的干扰，因为一般用来监测设备工作状态的传感器距离控制设备都比较远，两处的地电位可能差别较大，且传感器往往装于工业现场，周围由强电设备产生的电磁噪声较强，很容易产生地环路干扰。

造成地环路的原因：①两接地点电位不同，存在较大的电位差，产生差模电压对电路造成干扰；②由于互联设备处于较强的电磁场强中，在地环路中感应出环路电流，从而对电路造成干扰。

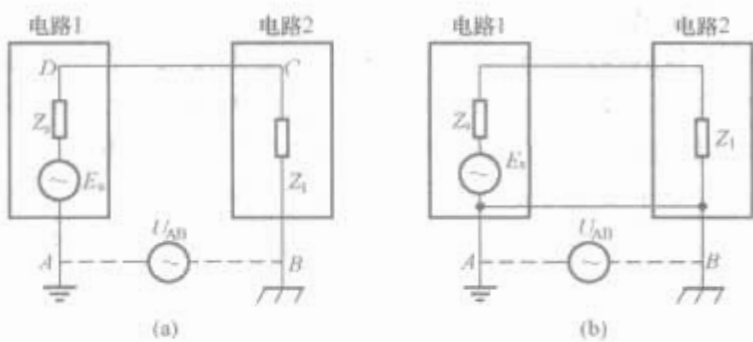


图 2.8-31 地环路的构成
(a) 单根信号线的地环路；(b) 双根信号线的地环路

通过以上分析，解决地环路干扰的方法，其基本思路有两个：①减小地线阻抗，从而减小干扰电压；②增加地环路阻抗，从而减小地环路电流。

解决地环路干扰常采用以下措施：

3.3.3.1 隔离变压器

如图 2.8-32 所示，电路 1 的有用信号通过变压器的磁场耦合传输到电路 2 去，而地环路产生的共模电流由于方向相同在变压器一次绕组中互相抵消，从而起到了隔离作用。

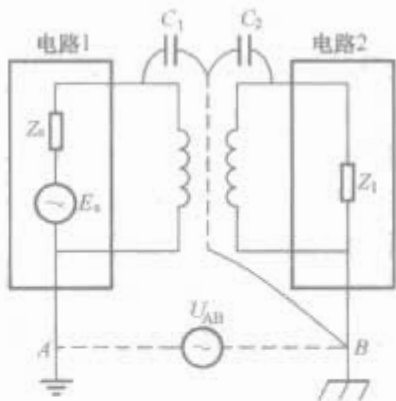


图 2.8-32 隔离变压器切断地环路

但变压器并非理想的，一次、二次绕组之间存在着分布电容，共模电流可通过分布电容从一次侧耦合到二次侧上去，从而流向负载。为了减小分布电容，提高变压器的隔离效果，应在一次、二次绕组之间加一层金属屏蔽层。屏蔽层必须接地，且必须接在负载端，否则不起隔离作用。

隔离变压器的缺点是不能传输直流信号和频率很低的信号。

3.3.3.2 共模扼流圈

在电路 1 和电路 2 之间插入共模扼流圈，如图 2.8-33 所示，共模扼流圈可传送差模信号，直流和频率很低的差模信号都可通过。但对于高频共模噪声则呈现很高的阻抗，故它常用于抑制地环路干扰。另外，铁氧体磁环套在两根导线上也可同样起到共模扼流圈的作用(实为单匝共模扼流圈)。

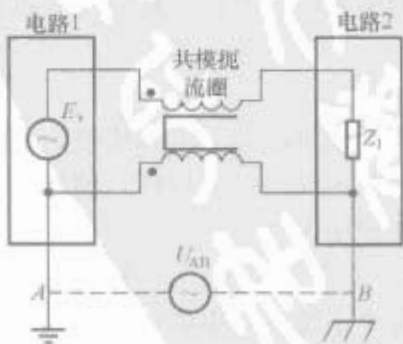


图 2.8-33 共模扼流圈切断地环路

3.3.3.3 光电耦合器

如图 2.8-34 所示，在电路 1 和电路 2 之间插入光电耦

合器。光电耦合器是把电信号变成光信号，再把光信号还原成电信号的器件。光电耦合器只能传输差模信号，不能传输共模信号，故可完全切断两个电路之间的地环路，光电耦合器可以传输直流和低频信号，响应速度快，分布参数小，体积小，便于安装，已广泛应用于数字电路中，频率高达10MHz以上。但应注意，光电耦合器中电流与发光强度的线性关系较差，传输模拟信号易产生失真，因此使用受到一定的限制。

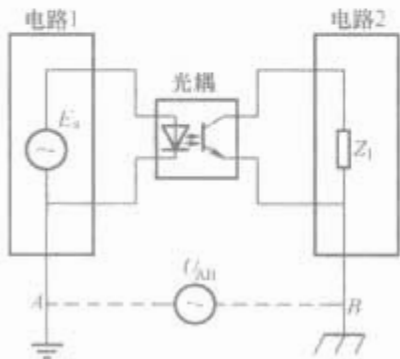


图 2.8-34 光电耦合器切断地环路

3.3.3.4 光纤传输信号

用光纤代替电子系统内的普通信号线缆，可防止外界的电磁干扰和电磁脉冲的影响，提供良好的电气隔离；另外光纤损耗极小，故可远距离传输。

其工作原理为用发光二极管或固态激光器件把电信号转化为光信号后注入光纤电缆；在接收端，光电二极管将探测到的光信号还原为电信号。

使用光纤传输信号，频谱范围宽，损耗小，传输距离远，抗干扰能力强；缺点是价值较贵，成本高。

3.3.4 悬浮地

悬浮地是指电子设备地线系统在电气上与建筑物的接大地系统相绝缘。这样大地系统的电磁干扰就不能传导到设备。另一种情况是有些电子设备中为防止机箱上的干扰电流直接耦合到信号电路，故意将电路单元的信号地线与设备机箱或机柜绝缘，称之为电路单元的悬浮地。

在低频情况下悬浮地，对抑制共模干扰信号比较有利，提高设备抗干扰的能力；在高频时，由于分布电容的存在，悬浮地就很难存在了。

悬浮地的缺点是设备外壳容易出现静电积累，当电荷达到一定程度后，会产生静电放电，在雷电环境下，静电感应产生的高压会在设备机箱与内部其他部件之间产生飞弧。另外，由于电子设备一般采用电网供电，而电厂、变电站电网是以大地为接地基准的，当电网相线与浮地的机箱短路时，有引起触电的危险，因此，这种接地方式不宜用于通信系统和一般的电子设备。

用变压器或光电耦合器传输信号，阻隔地环路干扰的措施，就是把个别单元电路的信号地对整个设备接地系统悬浮的实例。

3.3.5 混合接地

在地线系统中使用电感、电容连接，利用电容、电感器件在不同频率下有不同阻抗的特性，使地线系统在不同的频率具有不同的接地结构。

在图 2.8-35(a)中，系统工作在低频状态时，为避免公共阻抗耦合，需要系统单点串联接地；当这个系统暴露在高频频强电场中时，屏蔽电缆需要双端接地，图 2.8-35(a)就很好地解决了这个问题。当低频时， $1/j\omega C$ 很大，相当于开路，只有 A 点接地；当频率很高时， $1/j\omega C$ 很小，相当于短路，则 A、B 两点相当于都接地，实现了多点接地的目的。

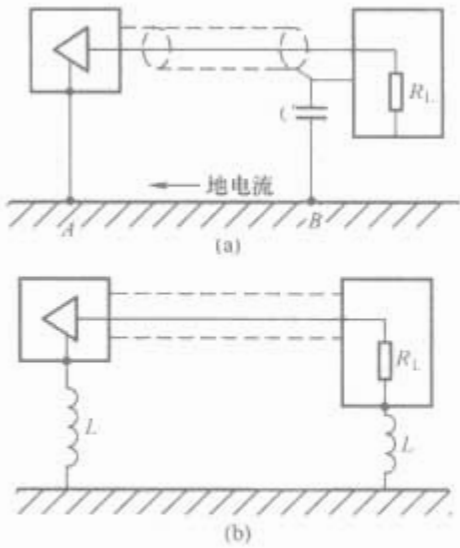


图 2.8-35 混合接地
(a) 高频接地；(b) 低频接地

接地电容的容量一般在 10nF 以下，耐压要求较高，取决于需要接地的频率。

图 2.8-35(b)是一个受到地环路电流干扰的系统。如果将设备的安全地断开，地环路就被切断，可解决地环路电流干扰。但出于安全考虑，机箱必须接到安全地上。因此，图 2.8-35(b)所示的接地方式，正好解决了这个问题，对于频率较高的地环路电流，由于 $X=j\omega L$ 的存在，地线相当于断开，而对于低频，如 50Hz 的交流电，机箱都是可靠接地的。

3.3.6 地线的分类

地线有 3 种基本类型：安全地、系统地和屏蔽地。以安全为目的的保护地线，常与金属机壳架相连的，称为安全地。为设备中各个电路提供稳定的零基准电位的工作接地，其地线称为系统地。为抑制噪声，电缆、变压器等的屏蔽层需接地，相应的地线称为屏蔽地。

机电一体化系统中，电气和电子设备常可分为强电设备、弱电设备和强弱电混合设备。电动执行机构通常为高压大电流的强电设备，它们的接地主要考虑安全接地，以防止因绝缘损坏而造成触电事故。弱电设备主要指用于处理信息和控制的计算机系统，一般主要考虑系统地和屏蔽地。机电一体化系统中的驱动机构是强弱电混合设备的典型；另外，一些可编程程序控制器如 PLC 是弱电设备，但常与强电设备一起安装于使用现场，构成强弱电混合装置。对于强弱电混合设备，3 种接地线都必须考虑。

对复杂电子设备的地线系统必须按下述步骤设计：

- (1) 分析设备内各类电气部件的主要干扰特性和类型。
- (2) 搞清楚设备内各电路单元的工作电平、信号种类和抗干扰能力。
- (3) 按电气部件和电路特性分类划组，确定相应的地线种类和数量。
- (4) 画出总体布局图，排出地线系统图，拟定结构实施方案。

3.3.7 屏蔽电缆的接地

屏蔽电缆是在导线绝缘外面再包一层金属薄膜（即屏蔽层）的电缆。屏蔽层通常是铜丝编织网或无缝铝箔或铜箔。屏蔽电缆的种类很多，一般可分为普通屏蔽电缆、双绞屏蔽电缆和同轴电缆。

同轴电缆的分布电容小，可以传输频率很高的信号。普通屏蔽电缆因芯线和金属编织屏蔽层间的分布电容较大（可达 100pF/m），因此高频传输损耗较大，只适用于低频使用。

如果仅从信号传输损耗来考虑,而不涉及电缆的屏蔽特性,则以上3种屏蔽电缆的使用频率范围大致如下:

(1) 普通屏蔽电缆。适用于30kHz以下,特殊情况可用到几百千赫。

(2) 双绞线和双绞屏蔽线。正常使用于100kHz以下,特殊情况可用到几兆赫。

(3) 同轴电缆。适用于1000MHz以下,更高频率应采用波导管。

屏蔽电缆的屏蔽层通常是由铜、铝等非磁性金属材料制成,而且厚度非常薄,远小于使用频率的金属材料的集肤深度。因此,屏蔽层所起的屏蔽效果主要不是由于金属体本身对电场、磁场的反射、吸收分流而产生的,而是由于屏蔽层的接地产生的,接地的形式将直接影响其屏蔽效果。

屏蔽电缆的屏蔽层只有在接地以后才能起到屏蔽作用。对于电场和磁场的屏蔽,其接地的方式是不相同的。

3.3.7.1 电场屏蔽

如图2.8-36所示,导线1为骚扰源,导线2在敏感电路中,用的是屏蔽电缆。

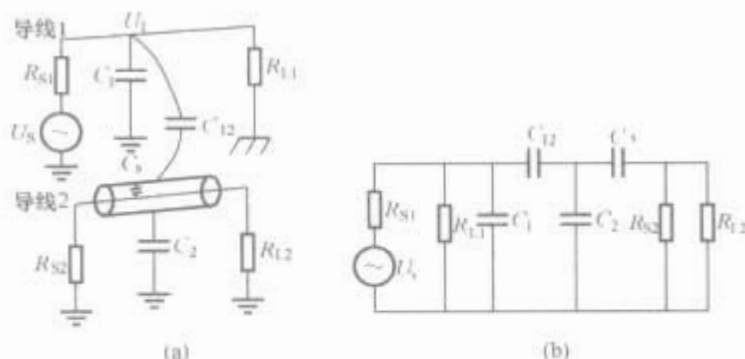


图 2.8-36 屏蔽电缆的电场屏蔽
(a) 原理图; (b) 等效电路

由图2.8-36(b)可知,导线1上的电压 U_1 可通过 C_{12} 电容耦合到屏蔽层上,再经 C_s 电容耦合到导线2的芯线上,如将导线2的屏蔽接地即 C_2 短路,则 U_1 在经 C_{12} 后被屏蔽层短路至地,不能传到导线2的芯线上,从而起到了电场屏蔽的作用。屏蔽层的接地点常选在屏蔽电缆的一端,故称为单端接地。

如果骚扰源电路用屏蔽电缆(主动屏蔽),接收电路用一般导线,在屏蔽层单端接地后同样能起到电场屏蔽的作用。由此可见,屏蔽电缆既能对电场起到被动屏蔽作用,也能起到主动屏蔽的作用,条件是屏蔽层必须接地。

但应指出:如果屏蔽层不接地,则有可能造成比不用屏蔽线时更大的电场耦合,因为屏蔽线的屏蔽层面积比普通导线大,与其他导线的耦合电容也大,可能产生的耦合量也大。

在以上分析中,使用了屏蔽层本身阻抗为零,接地后屏蔽层处处都为零电位。但实际上,这是不可能的,只有在频率较低或电缆长度小于 $1/20$ 波长,即 $L < \lambda/20$ 时才近似成立。当频率较高或电缆长度大于 $L > \lambda/20$ 时,屏蔽层的阻抗已不能忽略,如只在屏蔽层一端接地,将迫使噪声电流流过较长距离后才能入地,电流在屏蔽层阻抗上的压降使屏蔽层上各点电位不同,从而影响了电场的屏蔽效果。为了使屏蔽层尽可能保持等电位,频率较高或电缆较长时应每隔 $\lambda/10$ 的距离接地一次。

3.3.7.2 磁场屏蔽

假设在骚扰源回路中使用了屏蔽线。从图2.8-37可见,如果屏蔽层不接地或只有一端接地,屏蔽层上无电流流过,电流经地面返回,故屏蔽层不起作用,不会减少骚扰源回路

的磁场辐射。如果屏蔽层两端接地,接地点分别为B和A点,则屏蔽层中的电流 I_s 应为

$$I_s = \frac{j\omega MI_1}{j\omega L_s + r_s} \quad (2.8-50)$$

由于 $L_s = M$,因此

$$I_s = \frac{j\omega I_1}{j\omega + \omega_0} \quad (2.8-51)$$

式中: ω_0 为 $\omega_0 = r_s/L_s$,称为屏蔽层的截止频率。

因为 $I_s \leq I_1$,当 $\omega > 5\omega_0$ 时, $I_s \approx I_1$, $I_g = 0$ 。

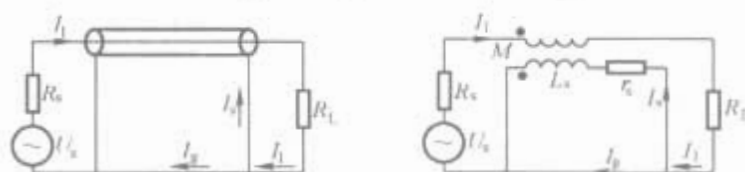


图 2.8-37 屏蔽电缆的磁场屏蔽

可见,当芯线电流的频率较高,大于5倍的屏蔽层截止频率时,该电流几乎全部经由屏蔽层流回源端。由于电流在屏蔽层上均匀分布,且把去流电流均包围在中间,故磁场被封闭于屏蔽层内,屏蔽层外由于磁场大小相等方向相反,互相抵消,抑制了噪声磁场的向外辐射。

另一种解释为已知环路电流总是沿着阻抗最小的途径流动,阻抗为 $Z = R + j\omega L$ 。当频率较低时,电阻起主导作用,频率较高时,电感的感抗起主导作用。环路电感大小主要决定于环路的面积。环路面积越小,环路电感也越小。

通过以上分析,可以得出如下结论:

(1) 屏蔽电缆既可用于对磁场的主动屏蔽,也可用于被动屏蔽。

(2) 减小接收回路面积即接收回路电流所包围的面积是减少外界磁场干扰的最有效的方法。

(3) 对于磁场屏蔽,屏蔽电缆的屏蔽层必须两端接地。

3.3.7.3 地环路对屏蔽的影响

如图2.8-38所示,如果A、B之间存在电位差,则屏蔽层中就有噪声电流 I_s 流过,一方面 I_s 在屏蔽层的感抗和电阻上有压降;另一方面也会通过屏蔽层和芯线的互感 M 在芯线上产生感应电势。

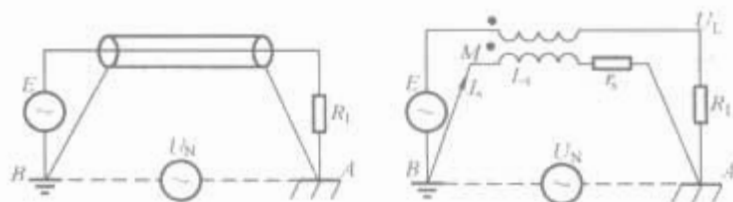


图 2.8-38 地环路对屏蔽的影响

$$U_L = -j\omega MI_s + j\omega I_s L_s + r_s I_s + E \quad (2.8-52)$$

因 $M = L_s$,所以

$$U_L = r_s I_s + E \quad (2.8-53)$$

从式(2.8-52)和式(2.8-53)可知,在负载上的电压,除有用电压外,还有噪声电压,噪声电压为噪声电流与屏蔽层电阻的乘积。这说明了地环路确实减弱了屏蔽层的屏蔽效果。

双绞屏蔽线可以克服以上缺点,信号电流在两根内导线上流过,一根是去流,一根为回流,而地环路产生的噪声电流则流过屏蔽层,由屏蔽层通过互感应到两根导线上的噪声电压因其大小相等且方向相同,在信号回路中将互相抵消,如图2.8-39所示。

3.3.7.4 屏蔽接地的方式

如图2.8-40及图2.8-41所示。屏蔽电缆的屏蔽层在接

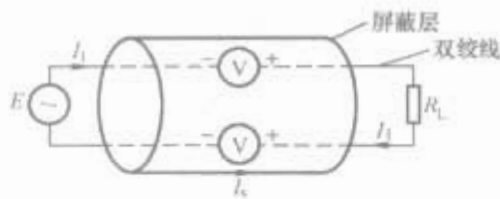


图 2.8-39 双绞屏蔽线克服地环路效应

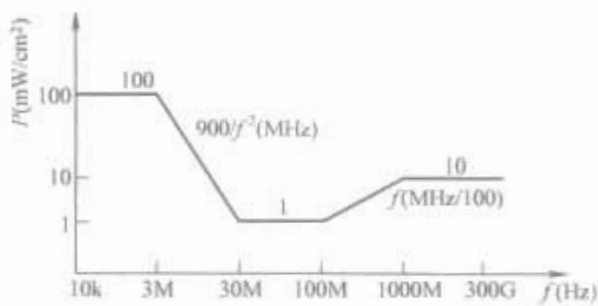


图 2.8-42 辐射场强密度与安全滞留时间的关系

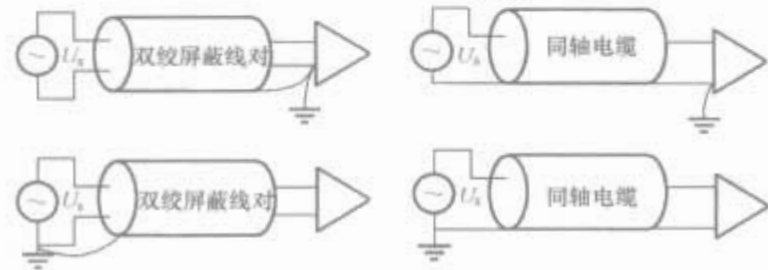


图 2.8-40 低频电路的屏蔽层接地方式

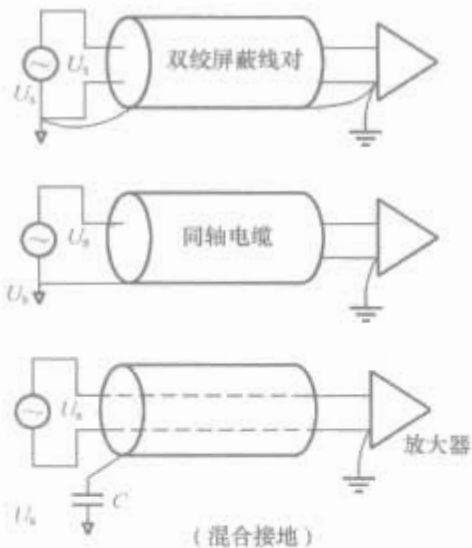
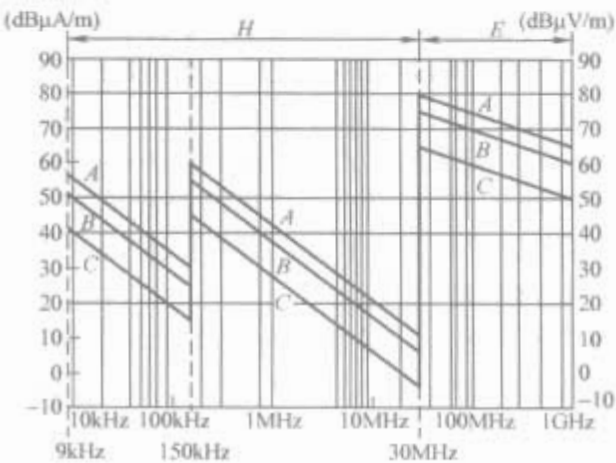
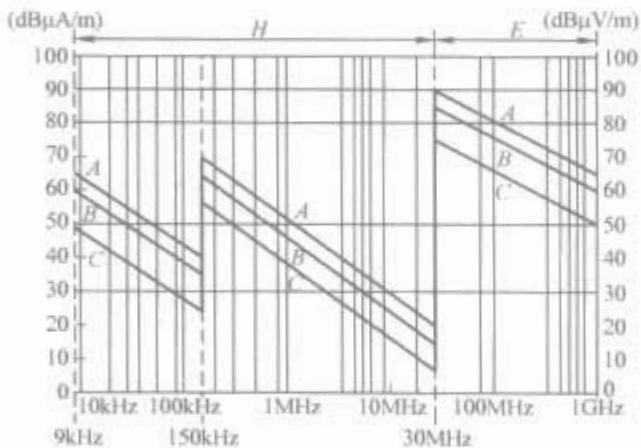


图 2.8-41 高频电路的屏蔽层接地方式



(a)



(b)

图 2.8-43 列车辐射发射的试验限值

(a) 列车辐射发射静态试验限值；
(b) 列车辐射发射慢行试验限值

面，供电系统尤其是电气化铁路的接触网、机车车辆电磁辐射以及传导骚扰对电网的影响。

4.1.1.1 供电接触网对外界的影响

随着电气化铁路的普及，干线铁路和许多城市都拥有了电气化铁路。机车车辆经受电弓从接触网上获取牵引能量。机车车辆在行驶过程中，受电弓与接触网之间存在跳动，从而引起接触网与受电弓之间拉弧，此电弧能量较高，频谱分布很广，既存在传导骚扰，又存在电磁场辐射骚扰。因此，这是铁路中存在的最大干扰源之一。

4.1.1.2 电磁辐射对外界的影响

列车在线路上运行时，由于广泛采用了变流技术（特别是高频开关技术的应用），成了一列移动的干扰源，它可通过车体本身、接触网及轨道，作为发射天线，向外界发送电磁辐射，对线路周围造成一定的影响。

4.1.1.3 传导骚扰对电网的影响

以图 2.8-44 所示的交—直电力机车为例，由于晶闸管变流器是非线性负载，工作时将产生高次谐波电流，流过电源内阻抗时将产生高次谐波压降，使电源端电压波形发生畸变，导致电网电压波形的严重畸变，影响同一电网下其他负载的正常运行。

4 设计要点

在人们的日常生活中，电磁兼容效应普遍存在，形式各异。如果电磁兼容效应严重，则将导致严重的故障或事故，同时对人体健康也有影响。因此，人们对自己生存的环境也越来越关心和重视。所谓的电磁环境，是指存在给定场所所有电磁现象的总和。

4.1 电磁环境要求

随着科学技术的进步，人类正进入信息化社会，人类生存环境也同电磁环境相互交融，随着城市人口的迅速膨胀，汽车、通信、计算机与电子、电气设备大量进入家庭，空间人为电磁能量每年增长 7%~14%，25 年环境电磁能量密度最高可增加 26 倍，21 世纪电磁环境会日益恶化，电磁辐射日益影响人类及动物的正常生活，已成为继水源、大气和噪声之后的第四大环境污染源。

随着环境保护意识的增加，人们对暴露在电磁场中可能危害健康的问题极为关心，美国国家安全研究所规定在 6min 内，辐射场强密度与安全滞留时间的关系为： $T=6X$ ，其中 X 为该频段场强密度规定值/该频段场强密度现场测量值，如图 2.8-42 所示。

欧盟对铁路周围环境制订了严格的要求，在 9kHz~1GHz 频率范围，给出了限制值（见图 2.8-43）。

4.1.1 铁路系统对外界电磁环境的影响

铁路系统对外界电磁的环境的影响，主要有以下几个方

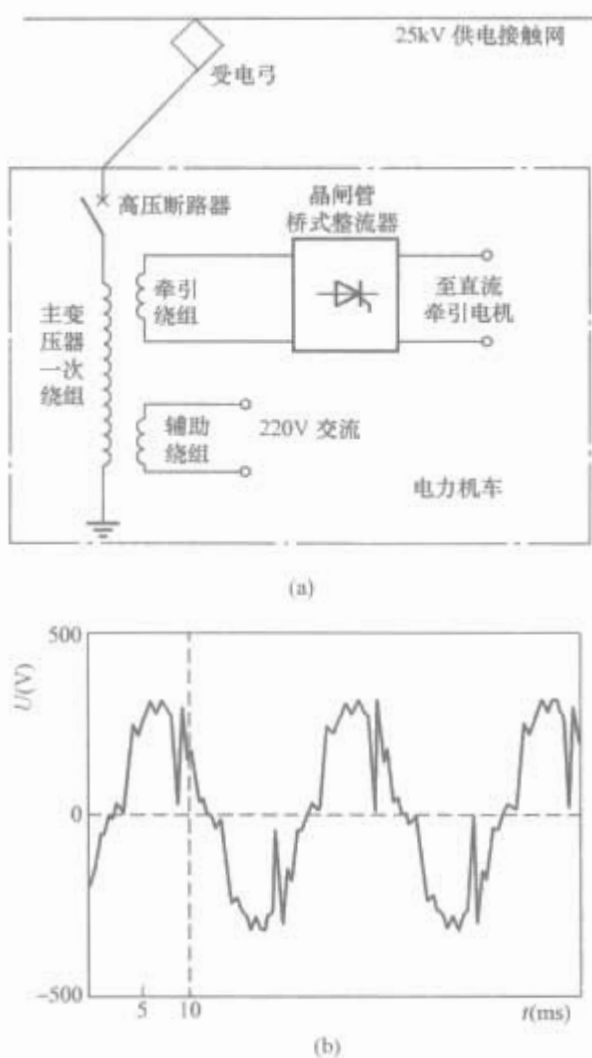


图 2.8-44 电力机车中晶闸管引起的电压畸变
(a) 交直电力机车原理框图；(b) 辅助电源电压波形

另外，从图 2.8-44(b)中也可知道，由于辅助端口电压畸变，通过传导，将对机车内部的用电器件产生传导骚扰。

另外，机车车体、轮对及钢轨既作为接地线，又作为电力回流线。由于机车车体本身电阻不为零，当有大电流流过时，使车体成为非等电位体，极有可能造成共地干扰。

4.1.2 外界电磁环境对列车的影响

由于铁路分布十分广阔，因此，它受到外界的电磁干扰也十分复杂。可划分为人为干扰及自然干扰。自然干扰主要有雷电及大气噪声。人为干扰主要为通信、广播、电视及雷达等。另外，其他用电设备产生的干扰可经供电接触网，以传导干扰的形式，影响到列车的正常工作，如列车甲与列车乙同时在一个区间内行驶时。列车甲的干扰既可通过空间辐射对列车乙产生干扰影响，也可通过供电接触网以传导干扰的方式影响列车乙；反之，列车乙也可通过以上方式影响列车甲。

4.1.3 列车对外界电磁场环境干扰的抑制

通过以上分析，明确了列车对外界电磁干扰的模式。从电磁干扰三要素来看，就是找出了干扰源及传播途径。因此，减少列车对外干扰就可以从这两方面来着手。

(1) 抑制谐波，提高功率因数，改善供电网质量。在交流传动电力机车上，采用了四象限变流器，消除了低次谐波，解决了由晶闸管整流器等所引起的非线性畸变，大大改善了功率因数，也有效地抑制了传导干扰。

(2) 加装过电压吸收片抑制尖峰电压。采用真空断路器，减少主断路器断开及合闸时所产生的操作过电压；在主变流器上，加装 RC 阻容吸收装置；改善主变流器的 dv/dt 及 di/dt 上升速率，以便抑制由此产生的操作过电压，减少尖峰电压，保护其他用电设备的安全。

(3) 采用多层屏蔽减少列车对外辐射。对于交流传动机车车辆，对主变流器等使用金属或合金壳体，具有较好的屏蔽性能，可大大减少对外的辐射。

(4) 合理布线减少电缆的天线效应。将强干扰源的电缆，如变频器的输出电缆，置于钢管或金属屏蔽的布线槽内，从而减少了经过电缆的对外发射干扰。

(5) 列车的所有部件均实施电磁兼容性测试。所有车用部件都必须满足相应的标准要求，才能上车，从源头上消除列车对外的电磁干扰。

通过以上 5 种措施的实施，基本解决了列车对外界电磁环境干扰的影响，基本达到了电磁兼容性标准的要求。实践表明：列车对外界的辐射发射并没有过多影响人们的存在环境。

图 2.8-45 所示为 SS₆ 型电力机车运行过程中对外干扰的测试结果。

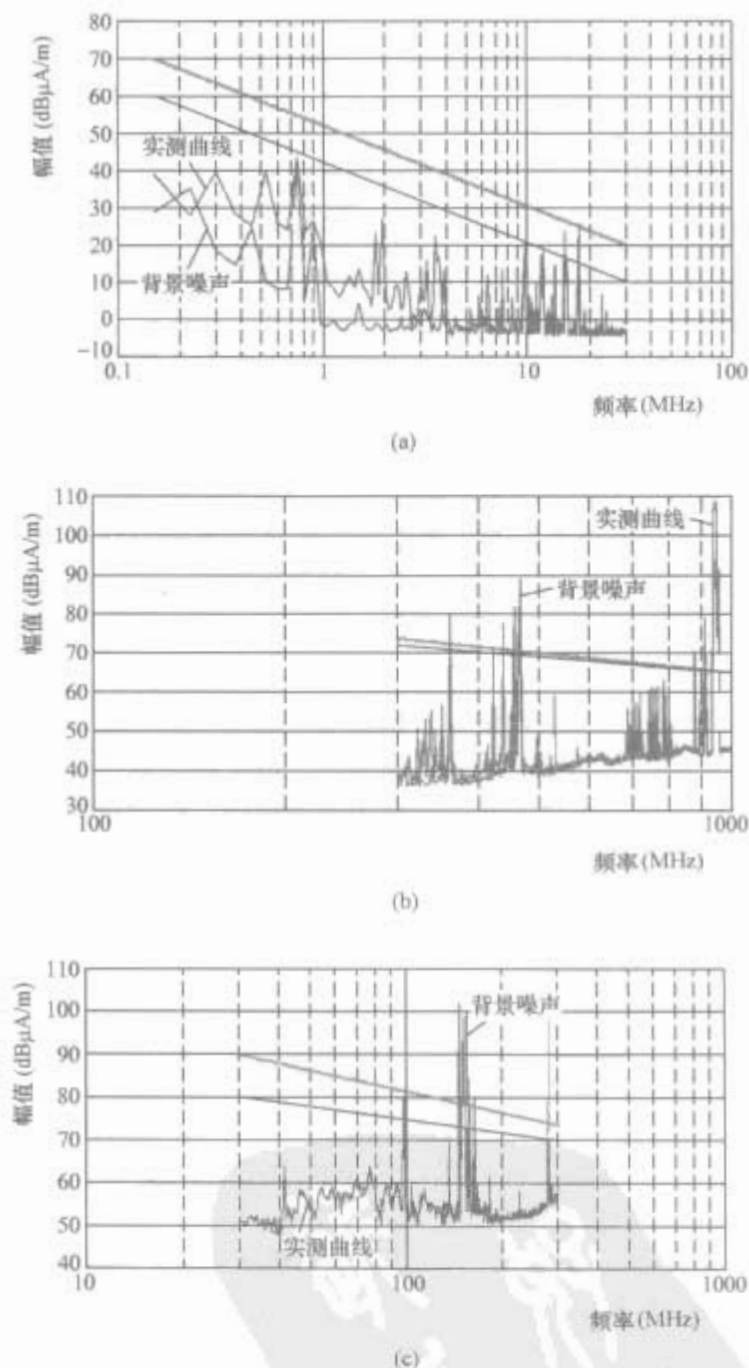


图 2.8-45 SS₆ 型电力机车慢行时的对外辐射
(a) 9~30MHz 磁场测试曲线；(b) 300~1000MHz 电场测试曲线；(c) 30~300MHz 电场测试曲线

4.2 系统间电磁干扰的预测及控制

有效地控制电磁干扰往往十分困难，这是因为电磁干扰方位与耦合通路的大量可能产生的组合涉及许多变量。由于电磁干扰情况的固有复杂性，若要及时、有效、经济地解决电磁干扰问题，弄清干扰源的特性及传播途径，是头等重要

的事。

电磁干扰耦合途径有许多,概括起来可分为以下5种耦合:

- (1) 公共阻抗耦合。
- (2) 辐射电磁场耦合。
- (3) 窜扰的电容差模耦合。
- (4) 窜扰的电感差模耦合。
- (5) 传导耦合。

4.2.1 机车(动车)系统的划分

机车(动车)一般常可分为主电路系统、辅助电路系统及控制电路系统,以及信号、网络控制系统等。它们组合在一起,构成了功能齐全、结构复杂的机车电气系统。

4.2.1.1 主电路系统

以交一直电力机车为例,主电路按功能可分为高压电路、调压整流电路、牵引负载电路、制动负载电路以及保护电路5部分。数千安的大电流及上千伏的高电压,不仅产生很强的电场,而且还会产生极强的磁场以及电磁场。这5部分电路除具有以上共性外,还各有其自身的特点。

(1) 高压电路主要由受电弓、主断路器及牵引变压器组成。其主要干扰产生于受电弓与接触网所产生的拉弧,以及主断路器在闭合及断开时所产生的操作过电压,经牵引变压器的一次侧,耦合至牵引变压器的二次侧回路,从而对二次侧回路产生影响。

(2) 调压整流电路主要由牵引变压器的二次绕组、整流器、平波电抗器等组成。这一部分产生的干扰,主要是主变流器柜晶闸管的非线性所引起,因较大的 dv/dt 及 di/dt 的变化将产生很强的电磁干扰。

(3) 牵引负载电路主要由牵引电动机及轮对所组成。在交一直机车上,牵引电动机均为脉流电动机,带有机械换向器。在换向过程中,常常会产生火花,这是牵引电动机产生干扰的主要原因。

另外,电气化铁路为单相供电,接触网为火线,钢轨为回流线,机车的轮对只是接地导体。由于机车载体存在一定的阻抗,机车车体并非为一理想等电位体,特别是流过的负载电流,包含丰富的高次谐波电流,因而将车体作为接地参考点,必须慎重处理。

4.2.1.2 辅助电路系统

交一直机车(动车上),辅助电路一般由辅助变流器、充电器、负载风机及其他用电设备所组成,它主要服务于主电路系统,对主电路系统的正常工作提供后勤保障。

辅助变流器主要作用就是提供三相电源,给风机负载等供电。由于采用变频技术,这是辅助系统产生干扰最大的部件。

充电器(AC/DC)实质是开关稳压电源,主要向车载蓄电池及控制电路供电。由于采用了开关电源技术,故它亦是较大的干扰源。

其他用电设备主要有机车空调电源、取暖设备、司机用电等。机车空调电源由于亦采用了变频技术,因此亦会产生较强的对外干扰。

4.2.1.3 控制电路系统

机车(动车)控制电路由两部分组成:一部分主要由有触点电器(如司机控制器、继电器、接触器等)构成;另一部分为无触点电路,这部分电路主要由电子电路及微机控制电路组成。这两部分有机结合,构成了具备复杂控制功能的机车“大脑”。

(1) 有触点控制电路。有触点控制系统主要由司机控制

器、接触器、继电器等有触点电器构成,机车上的这些控制电器以及信号、照明等装置,全由直流110V控制电源供电。司机通过操控这些控制电路来间接地控制机车主电路及辅助电路,以完成控制机车牵引、制动、向前、向后、速度调节等各种工况;另外还控制各辅助机械开、停和各照明、信号等有关主令电器;同时还提供各种保护功能,为无触点电路及网络控制电路提供各种信息指示及信息反馈。这一部分电路的操作过电压是其主要表现形式,对无触点控制电路及网络控制电路有潜在的危害。

(2) 无触点控制电路。机车(动车)的无触点控制电路,早期采用模拟电子控制,后来随着计算机技术的迅猛发展,普遍采用微机控制技术。整个系统为弱电系统,极易受到外界的影响和干扰,一旦受到干扰,将使整个系统不能正常工作,造成微机控制的死机、误触发及复位等,直接关系到列车的行车安全。

4.2.1.4 网络控制系统

网络技术的发展与成熟,极大地推动着运输装备的技术进步,现代机车车辆已广泛采用了网络控制技术。网络控制系统是典型的弱电系统。由于系统所处的工作现场电磁环境十分恶劣,所控制的高电压大电流系统往往产生强烈的电磁噪声,其量值可达到计算机的工作电平,极易对网络控制系统产生干扰。网络控制系统也属于高度敏感设备。

4.2.1.5 信号系统

为确保列车的安全、正点运行,在机车(动车)上均装有车载信号装置及安全监控设备,它们主要负责将地面的运行控制信号传送到机车上,指挥调度列车的正常运行;安全监控装备(俗称列车的“黑匣子”)在实现速度安全控制的同时,采集记录与列车安全运行有关的机车(车辆)运行状态信息,并促进机车运行管理的自动化。整个系统以弱电为主,极易受到外来干扰的影响,属于高度敏感设备。

4.2.2 机车系统电磁干扰的抑制

从抑制骚扰源,到切断骚扰的传输途径,再到提高敏感设备的抗扰能力,是系统达到电磁兼容的主要手段。而其中对骚扰源采取措施,减小骚扰发射的大小,往往可取得事半功倍的效果。

4.2.2.1 变流器及其开关管骚扰的抑制

交一直机车主要使用晶闸管移相触发整流电路来进行调压,最终实现列车的调速控制等;在交一直一交机车(动车)中,也可能采用晶闸管的整流电路,将单相交流整流为直流,再由逆变器将直流转变为三相交流,驱动三相异步电动机。

晶闸管工作时,瞬间开通或关闭很大电流,对电源而言是非线性负载,晶闸管整流装置的网侧电流是非正弦波,往往是上升沿和下降沿很陡的梯形波,含有丰富的谐波。谐波能使功率因数下降,电源电压波动、畸变。高次谐波将向外产生辐射。针对晶闸管整流装置产生的骚扰,可从低频和高频两个方面采取抑制措施。

减少谐波和提高功率因数的措施有:

(1) 增加牵引变压器的抽头,分为几段桥。低电压时使用低电压抽头;高电压时,使用几组低电压绕组叠加方式,以减小触发角,改善波形。

(2) 在网侧整流器并联滤波器,以滤除整流电路产生的3、5、7次及11次的谐波含量和对无功功率进行补偿。

(3) 利用牵引变压器的漏感,作为串接的线路电抗器,减小由于晶闸管换相时产生的电压缺口对电网影响程度,从

而改善电源端口的品质。

(4) 采用四象限控制的 PWM 技术, 可同时提高网侧功率因数和减少网侧的谐波电流。

高频噪声的抑制方法有:

(1) 在晶闸管支路中串入电感或套上磁环。晶闸管高频噪声产生的主要原因是通断时电流变化率 di/dt 太大, 串入电感后, 可以减小电流变化率, 从而减小高频噪声分量。

(2) 在晶闸管的阳极与阴极之间并联 RC 吸收支路。在晶闸管两端出现的过电压, 往往以高频振荡形式出现, 并联 RC 吸收支路可避免产生高频振荡。

(3) 采用屏蔽方法。对小的整流装置 (如辅助变流器中的整流模块), 为了抑制其高频噪声向空间传播, 把整个装置用金属外壳屏蔽起来, 引出线可用金属屏蔽线, 再与滤波器配合, 可得到较好的效果。

4.2.2.2 高频开关管骚扰抑制

(1) 在开关管两极之间并联 RC 吸收电路, 以吸收和避免产生高频振荡。

(2) 在输入、输出回路中, 插入高频滤波器, 以抑制高频的干扰。

(3) 输入、输出导线采用金属外壳屏蔽起来, 以抑制其高频噪声向空间的传播。

(4) 将输入、输出导线双绞, 以减少差模辐射干扰及磁场干扰。

(5) 采用屏蔽方法, 对中小功率的变频器, 可把整个装置用金属机箱或机柜将其屏蔽起来, 配合滤波器, 可获得较好的效果。

4.2.2.3 感性负载的瞬态噪声抑制及其触点保护

(1) 电感负载的保护。如果电路的负载是感性的, 在切断回路时电感两端将产生很高的瞬间电压, 使开关的触点间产生飞弧而损坏触点, 伴随产生强烈的脉冲噪声, 通过辐射和传导向外发射, 影响其他电路特别是电子、微机控制电路的正常工作, 故在机车 (动车) 上, 电感负载两端或开关触点处, 一般都加装保护措施 (见图 2.8-46)。

(2) 开关触点的保护。切断电感性负载时防止开关触点产生火花放电的方法, 除了在电感负载二端加能量释放电路外, 也可在开关触点上加保护网络, 最常用的是 RC 保护网络, 如图 2.8-47 所示。

4.2.3 车辆系统的划分

随着人们生活水平的不断提高, 人们对生活的质量要求也越来越高, 旅客列车功能越来越高, 越来越完善; 但车辆系统也日益复杂。车辆的电气系统大致可分为如下几个部分: 供电系统、控制系统、网络控制系统、多媒体影视系统等。

(1) 供电系统。客车车辆供电系统有两类模式: 一类为旅客列车自带柴油发电车, 发电车直接提供三相 380V 交流电压给每节车厢, 此 380V 交流电源不仅向空调电源供电, 也向 110V 充电电源及茶炉等供电。另一类为列车牵引的电力机车经 600V 供电系统向每个车厢供电, 600V 直流经变流器逆变成三相 380V 交流, 给空调机组供电, 同时, 600V 直流还向 110V 充电器及茶炉等供电。供电系统最大的干扰源来自逆变电源及 110V 充电器。照明由于采用了电子镇流器, 电子镇流器亦为一大干扰源。

(2) 控制系统。客车车辆的控制系统一般均由 110V 直流供电, 主要为车上的四合一控制屏柜。110V 电源不仅为有触点电路供电, 也为无触点电路供电, 而无触点电路一般均带有开关电源; 另外, 110V 电源也为单相逆变电源供电。

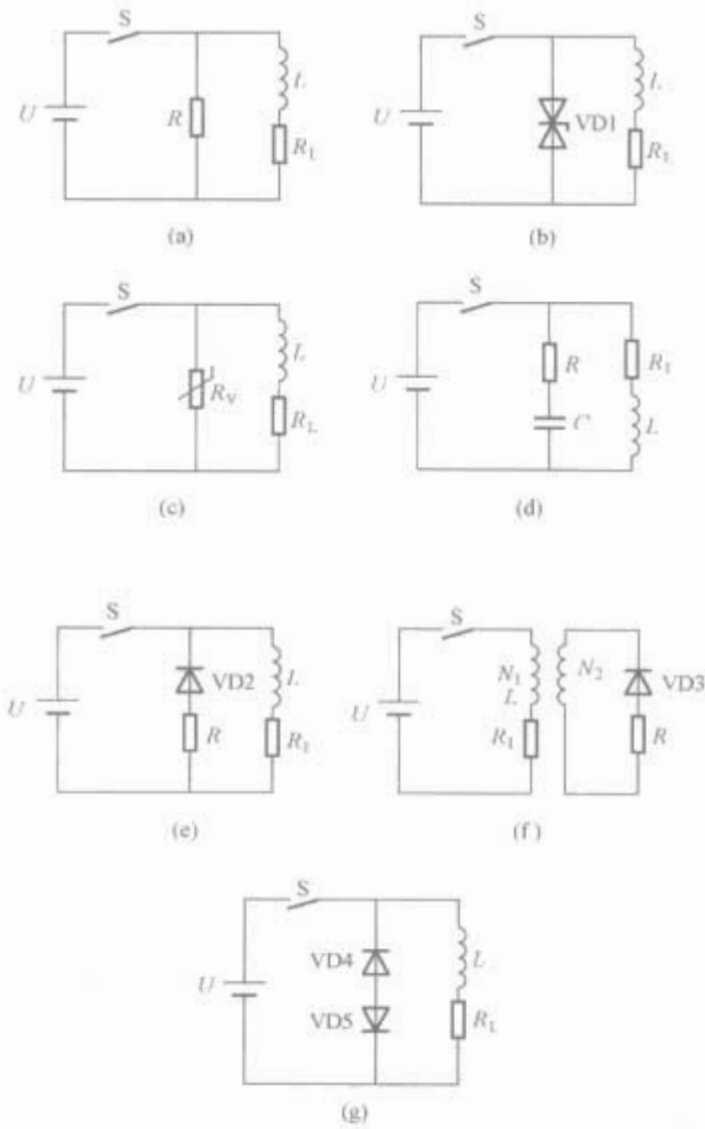


图 2.8-46 电感负载两端并联放电支路
(a) 并联支路; (b) 并联双向稳压管支路;
(c) 并联压敏电阻支路; (d) 并联 RC 支路;
(e) 并联二极管支路; (f) 耦合线圈放电支路;
(g) 并联二极管—稳压支路

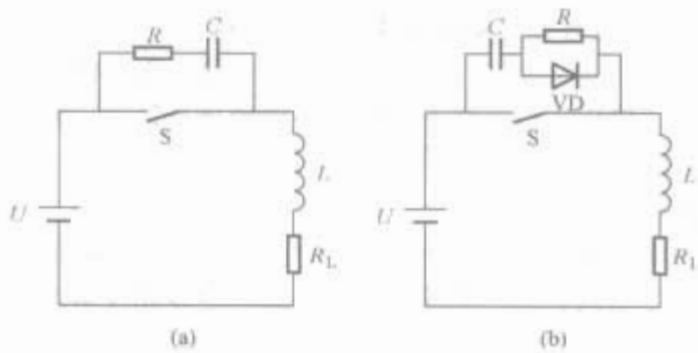


图 2.8-47 触点保护网络
(a) RC 网络; (b) RC-VD 网络

因此, 控制系统中的开关电源、单相逆变器及接触器、继电器等均为较强的干扰源。

(3) 网络控制系统。为了便于司机和列车长及时掌控车厢内各电器是否正常工作, 以及对车厢内的电器实施控制, 在高档旅客列车上, 广泛使用了网络控制系统。网络控制系统较易受到电磁干扰的影响, 属于较敏感设备。

(4) 多媒体影视系统。多媒体影视系统由列车广播、电视播放器等组成, 音频信号及视频信号很容易受到电磁干扰的影响, 属于高敏感设备。

4.2.4 系统电磁干扰的抑制

经以上分析: 车辆上的逆变电源、110V 充电电源、单相逆变电源及开关电源为主要干扰源。针对各干扰源的特点, 采取相应措施, 对干扰的电磁骚扰进行抑制。

4.2.4.1 逆变电源

600V 直流供电经 PWM 控制后, 变为三相 380V 交流电压, 供空调机组使用。根据该产品特点, 采用如下抑制措施: 在 600V 直流输入端, 设置了多级 EMI 滤波器, 将逆变输出的 PWM 波形经正弦波滤波器变为输出正弦电压, 并在输出端口, 设置了多级 EMI 滤波器。在控制电源端口 (110V 输入) 亦增加了 EMI 滤波器。机柜外壳采用不锈钢钢板进行屏蔽, 尽量将对外干扰减至最低。另外, 逆变电源的输入、输出线电缆均穿过钢管, 避免对其他电缆产生线—线串扰。为保护车内环境安全, 节省空间, 逆变电源一般不放在车厢内, 而是悬挂于车体下部。

4.2.4.2 110V 充电电源

110V 充电电源由 600V 直流或三相 380V 交流供电, 经斩波整流变为 110V 向蓄电池充电的同时, 还为其他用电设备供电, 属于高频开关电源。因此在其输入端设置了 EMI 滤波器, 在 110V 输出端亦设置了 EMI 滤波器。外壳采用了不锈钢材料作屏蔽; 同时, 其输入、输出电缆均穿过钢管, 尽量将对外干扰减至最低。110V 充电电源亦悬挂于车体下部。

4.2.4.3 单相逆变器

单相逆变器主要是将 110V 直流经升压再变换为单相 50Hz、220V 交流, 为旅客所携带的用电物品提供电能, 属于逆变电源, 故在其 110V 直流输入端设置了多级 EMI 滤波器, 并将 PWM 波经正弦波滤波器变换成单相 50Hz、220V 交流电压。在最终的输出端口设置了 EMI 滤波器, 机柜外壳亦采用了不锈钢材料进行屏蔽。其输入、输出电缆等均从钢管中穿过。该装置置于车体下部。

4.2.4.4 48V 等开关电源

48V 等开关电源主要置于四合一控制屏柜内, 作为低压控制电路的控制电源。由于采用了开关技术, 因此亦需采取措施, 如增加了 EMI 滤波器, 金属外壳全封闭等, 以防电磁泄漏。

4.2.5 弱电与敏感系统电磁干扰的控制

由于机车 (动车) 空间有限, 强、弱电无法做到彻底分开。为了确保弱电系统不受强电系统的骚扰影响, 在处理弱电系统时, 应遵循如下原则。

4.2.5.1 布线分类

通常的布线都把各种电缆捆扎在一起或一起放于线槽内, 使 2 根或更多的电缆紧靠在一起, 很容易发生近场耦合或线—线串扰。因此, 电磁干扰控制主要是将电线和电缆按功率处理电平和按敏感度电平的等级进行分类, 以便使电磁干扰耦合减少至最小。表 2.8-9 按 30dBm 功率电平分组的布线分类的优点如下:

- (1) 电磁干扰源与敏感体趋向于分别编组, 功率等级分界出现在约 -20dBm 处。
- (2) 在一个线扎或线束中, 相邻导线的功率电平差不会超过 30dBm。

表 2.8-9 按 30dBm 功率电平分组的布线分类

分类	功率范围 (dBm)	特 征
A	>40	高功率直流/交流和射频源
B	10~40	低功率直流/交流和射频源
C	-20~+10	脉冲和数字源; 视频输出电路
D	-50~-20	视频输入电路; 音频和传感器敏感电路
E	-80~-50	射频和中频输入电路; 安全电路
F	<-80	天线和射频电路

4.2.5.2 系统配线

干扰电缆上的噪声强度和设备接口的敏感度是可以通过实际测量来确定的, 也可根据有关标准要求来确定。耦合系数越小, 要求电缆之间距离越大, 电缆的屏蔽要求越高。

干扰电缆上的噪声强度乘以耦合系数不大于被干扰电缆所接设备的接口敏感度。

表 2.8-10 给出了信号电缆的选型以及它们之间的敷设距离。

表 2.8-10 信号电缆选型和敷设距离

设备接口 敏感度(V)	2500	1400	800	400
信号线 电缆类型	普通 控制电缆	普通 控制电缆	普通 控制电缆	编织屏蔽 电缆
与低电力线 的间距(cm)	可平行 走线	可平行 走线	25	可平行 走线

表 2.8-11 给出了回路类型与电缆选择之间的相互关系。

表 2.8-11 根据回路类型选择电缆

设 备	回路类型	各自屏蔽 对绞电缆	总屏蔽 对绞电缆	总屏蔽 电缆	普通 控制电缆
计算机 设备	低电平模拟	✓			
	高电平模拟		✓		
	低电平数字	✓			
	高电平数字		✓		
其他设备	高电平模拟			✓	
	高电平数字			✓	
	晶闸管触发		✓		
	一般控制				✓

表 2.8-11 中打“✓”为选用电缆, 总屏蔽电缆指带有总屏蔽层的多芯电缆; 总屏蔽对绞电缆指总屏蔽层内有多对双绞线的电缆, 其总屏蔽层可抑制电场干扰, 双绞线可抑制磁场干扰; 各自屏蔽对绞电缆指每对双绞线都有屏蔽层, 外面再包一层总屏蔽层, 这种电缆还能防止电缆内部各线对之间的干扰。

4.2.5.3 地回路隔离

由于机车 (或动车) 地回路干扰十分严重, 因此弱电系统中, 输入、输出端口常采用地回路隔离, 最常用的为光电耦合器隔离。对控制高压电流设备, 如主变流器则以光纤隔离为主。

4.2.5.4 接地

- (1) 屏蔽电缆的屏蔽层一般采用单端接地。
- (2) 对于既有高电压又有大电流设备附近的弱电系统中的屏蔽电缆, 一般要求两端接地。
- (3) 机柜中的机箱可以采用悬浮地。

4.2.5.5 滤波

对进、出弱电系统的重要信号及电源线, 必须经滤波器滤波后, 才可进出。电源线上应使用电源滤波器, 信号线上应使用信号滤波器。滤波器必须正确安装及布置。

4.2.5.6 屏蔽

弱电系统应尽量远离强干扰源, 采用钢板或铝板作为机箱或机柜的屏蔽材料, 在条件许可时, 尽量采用厚一些的材料。在机箱或机柜上开孔时, 孔径应尽可能小, 一般为 $\phi \leq 5\text{mm}$ 。缝隙长度小于 $\lambda/10$ 。尽量采用连续焊接。对活动门

盖，在柜体与门盖之间应增加导电橡胶或其他导电材料进行屏蔽，确保机箱或机柜导电的连续性。

4.2.5.7 对敏感体采取的措施

(1) 空间隔离。将敏感体的电缆线远离强干扰源，或可采用十字交叉等手段，通过空间上的距离来减小强干扰源对其的影响。

(2) 屏蔽处理。敏感系统的机箱外壳采用良导体的金属材料作屏蔽，进出机箱的电缆采用屏蔽扭绞电缆或同轴电缆。

(3) 滤波处理。凡进入敏感设备机箱的电缆，尽量采用滤波器技术或使用铁氧体磁环等，以切断干扰的途径。

(4) 接地。一般采用单点接地，因为频率较低。合理划分地线系统，防止共地阻抗干扰。

总之，通过对干扰源的抑制及对敏感系统电磁干扰的控制，可较好地解决车厢内的电磁兼容问题。

4.3 系统内电磁干扰的抑制及控制

机车车辆的车载设备大多数为完整的强、弱电的混合体，例如交流机车的主变流器、辅助变流器、机车空调电源等；车辆上的单相逆变器、110V 充电器等。它们都有一个共同的特点：装置中既包含了较高电压和电流的电路；同时还包含有微机等的控制系统，此部分电路为典型的弱电电路。强弱电电路混合在一起，这为装置或设备的电磁兼容设计，提出了很高的要求。

4.3.1 系统内电磁干扰源的划分

在强、弱电混合设备中，主电路中的整流滤波电路及高频开关电路，包括逆变电路，这是系统内主要的电磁干扰源；其次，控制用的开关电源、接触器或继电器，也是典型的电磁干扰源，如图 2.8-48 所示。



图 2.8-48 典型的强、弱电混合系统的结构框图

4.3.2 系统内电磁干扰的耦合途径

在强、弱电混合设备中，电磁干扰的耦合途径也不外乎为辐射耦合及传导耦合两种形式。辐射耦合主要以近场耦合（见图 2.8-49）为主，既存在以电容耦合形式出现的电场耦合，也存在以电感耦合形式出现的磁场耦合，也可能电场、磁场耦合同时存在。传导耦合主要以共地阻抗耦合及共电源阻抗耦合出现。

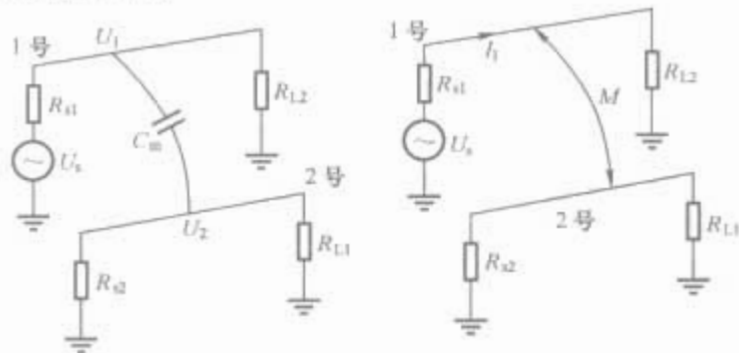


图 2.8-49 近场耦合方式

4.3.2.1 辐射耦合途径

在强、弱电混合设备中，由于设备内部空间非常有限，工艺人员从制造、产品美观方面考虑，常将强、弱电电缆用扎带绑在一起，或放于同一线槽内。因此，极易产生电缆与

电缆之间的窜扰。当为高压小电流时，易发生电容耦合形式的电场耦合干扰；当在低压大电流或电感线圈附近时，很容易产生以互感耦合形式的磁场耦合干扰。实际情况，一般电场耦合与磁场耦合同时存在。

电场和磁场同时存在的等效电路如图 2.8-50 所示。

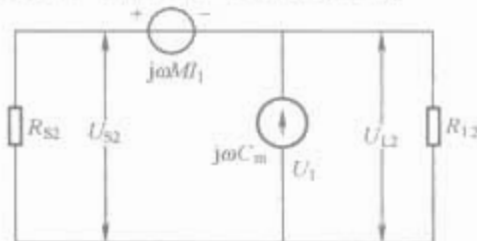


图 2.8-50 电场和磁场同时存在的等效电路

由图 2.8-50 可得

$$U_{S2} = j\omega C_m U_1 R_{S2} R_{L2} / (R_{S2} + R_{L2}) + j\omega M I_1 R_{S2} / (R_{S2} + R_{L2}) \quad (2.8-54)$$

$$U_{L2} = j\omega C_m U_1 R_{S2} R_{L2} / (R_{S2} + R_{L2}) - j\omega M I_1 R_{L2} / (R_{S2} + R_{L2}) \quad (2.8-55)$$

由此可知：如果近端噪声电压 U_{S2} 和远端噪声电压 U_{L2} 同相，说明电场耦合大于磁场耦合；如果 U_{S2} 和 U_{L2} 反相，则说明电场耦合小于磁场耦合。

接收电路的近端负载上的噪声电压 U_{S2} 大于远端负载上的噪声电压 U_{L2} ，因为在近端电感耦合产生的噪声和电容耦合产生的噪声是相同的，而在远端则是反相的。

4.3.2.2 传导耦合途径

传导耦合途径主要从电源线及地线上产生传导耦合干扰。

传导耦合的一类途径是由于电源可能向多路负载供电，电源阻抗耦合使多路负载间产生的互相干扰。如图 2.8-51 所示电路 1 及电路 2 到电路 n ，都从电源处获取能量，在公共电源阻抗 R_S 上都会产生电压降， R_S 上的电压降可能导致某些电路不能正常工作。另外，电路 1 与电路 2 之间，可能会产生相互影响，干扰某些电路的正常工作。

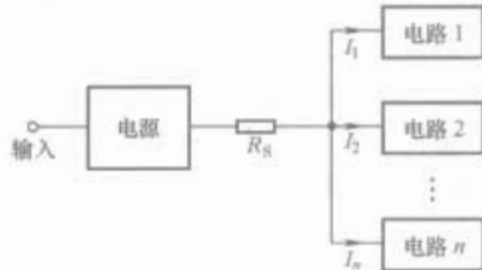


图 2.8-51 电源向多路负载供电

另一类传导耦合途径是在强弱电混合设备中，由于强电与弱电部分一般都以机壳地为参考平面，极易形成地环路干扰。

4.3.2.3 五种耦合形式

五种耦合形式是地环路耦合干扰、场对电缆所产生的共模或差模电压的辐射电磁场耦合、电缆对电缆的电容与电感的差模耦合和电源线与供电电路的耦合。这五种耦合占到电磁干扰情况的 95%。

有效地控制电磁干扰常常是十分困难的，因为电磁干扰方位与耦合通路的大量可能的组合涉及许多变量。由于电磁干扰情况固有的复杂性，若要及时地、有效地和用最佳费效比的方法解决电磁干扰问题，正确的判断及分析思路是十分重要的。

(1) 地环路耦合干扰。如图 2.8-52 所示，当 A、B 两点之间存在电位差，则在图中将存在地环路耦合干扰。

(2) 场对电缆所产生的共模电压耦合干扰。从图 2.8-52

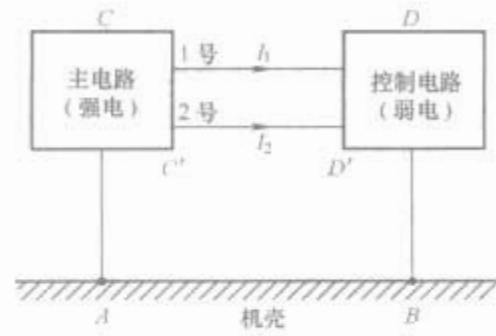


图 2.8-52 地环路耦合

可知，在 $ABCD$ 及 $ABC'D'$ 中，由于存在交变电磁场，因此在此闭合环路中产生感应电压，此电压有可能产生 I_1 及 I_2 的共模干扰电流。由于 I_1 及 I_2 大小不一样，当共模电压转为差模电压时，可能对控制电路造成影响。

(3) 场对电缆所产生的差模电压耦合干扰。由图 2.8-52 可知，在 $CDC'D'$ 环路中，由于存在交变电磁场，在此环路中极有可能产生感应电压，此感应电压将在 $CDC'D'$ 回路中产生差模耦合干扰。

(4) 电缆与电缆之间的耦合干扰。电缆与电缆之间的耦合干扰可分为电场和磁场耦合干扰，俗称线一线之间的“串扰”。

(5) 电源线与供电电路之间的耦合干扰。外部输入端传入的其他用电设备产生的干扰，可能对装置内的电路产生干扰影响。

解决以上 5 种耦合干扰的常用方法如下：

(1) 对地回路耦合的处理办法。使控制机箱或电路悬浮地（频率不高时）；采用平衡电路；使用隔离技术，如变压器隔离、光隔离等；增加共模扼流圈；功率等级相差较大的地线回路不能有公共部分。

(2) 对差模耦合的处理办法。使用双绞线对；采用屏蔽电缆，屏蔽层单端接地。

(3) 电缆与电缆间“串扰”的处理办法。使用屏蔽电缆，并注意屏蔽电缆的接地；使干扰源电缆远离敏感源电缆；干扰源电缆与敏感源电缆成正交；功率等级不同的电缆不能绑扎在一起或放在同一线槽内。

(4) 电源线上传导耦合干扰的处理办法。增加滤波器，抑制干扰的传输；采用多路隔离电源供电；共用一路电源输出向多路负载供电时，每路负载电路之间必须加强滤波，以防相互干扰。

4.4 印制电路板 (PCB) 的设计

PCB 是电子产品的基石，PCB 的电磁兼容设计是产品电磁兼容设计的基石。在 PCB 设计时，就必须充分考虑电磁兼容性的设计，只有这样，才能设计出合理、可靠、稳定的 PCB。

4.4.1 PCB 布局的一般原则

器件布局是设计 PCB 的第一步。正确的 PCB 布局不但可以增加 PCB 的视觉美感，还可提高产品电磁兼容水平。首先，要考虑印制电路板的尺寸大小。如果尺寸选择过大，会造成器件分布较散，器件之间的传输线有可能很长，造成阻抗增加，回路面积增大，抗噪声能力下降，同时，成本也会增加。

如果 PCB 尺寸选得过小，则器件会过于集中，器件散热变差，并且易发生线一线之间的串扰耦合。一般来说，进行整体布局时要遵守以下原则：

(1) 按照电路信号的流程安排各个功能电路单元的位置，使布局便于信号流通，并使信号尽可能保持一致方向。

(2) 以每个功能电路的核心元器件为中心，围绕它来进行布局。元器件应均匀、整齐、紧凑地排列，尽量减少和缩短各元件之间的引线和连接。一般电路应尽可能使元器件同一方向排列。这样，不但美观，而且便于批量生产。

(3) 在高频下工作的电路，要考虑元件之间的分布参数。尽可能缩短高频元器件之间的连接线，设法减小它们的分布参数和相互间的电磁干扰，易受干扰的元器件不能相互挨得太近，输入和输出元件应尽量远离。

(4) 对于信号线，特别是高频接口信号线，一定要防止信号线之间的耦合问题，在 PCB 设计初期，就要考虑到它们之间的走线关系。

(5) 某些元器件或导线之间可能有较高的电位差，应加大它们之间的距离，以免放电引起意外短路，带高电压的元器件应尽量布置在调试时不易触及的地方。

(6) 质量超过 14g 的元器件，应使用支架来加以固定，热敏元件应远离发热元件。

(7) 对于电位器、可调电感线圈、可变电容器、微动开关等可调元器件的布局，应考虑整机的结构要求。若是机内调试，则应放在印制电路板上便于调节操作的地方；若为机外调试，其位置要与调节旋钮在机箱面板上的位置相适应。

(8) PCB 板上的输入/输出连接器，最好尽量在 PCB 板的同一侧布置。

(9) 对于高频电路与连接器之间有直接信号连接时，PCB 板布局如图 2.8-53 所示。

(10) 对于高频电路与连接器之间无直接信号连接时，PCB 板布局如图 2.8-54 所示。

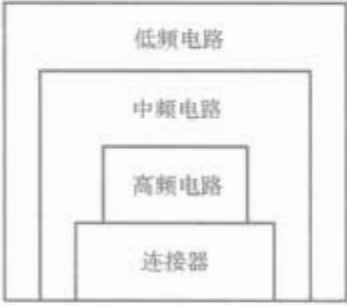


图 2.8-53 高频电路与连接器直接相连时 PCB 板布置图



图 2.8-54 高频电路与连接器无关时 PCB 板布置图

(11) 若电路中有模拟电路和逻辑电路，则应将模拟电路和逻辑电路分开，如图 2.8-55 所示。



图 2.8-55 PCB 板上有模拟电路和逻辑电路时 PCB 板布置图

4.4.2 PCB 单面、双面及多层板的选择

在任何数字系统中，特别是在高速器件的系统中，为了实现最佳性能，必须提供低阻抗的 RF 电流回路。此 RF 电流对外发射，可用下式来表示

$$E = 2.6 \times 10^{-14} I_s f^2 A / r \quad (2.8-56)$$

式中： A 为环形天线的面积， cm^2 ； f 为频率， MHz ； I_s 为源电流， mA ； r 为从发射源到接收天线之间的距离， m 。

使用单面板 PCB 设计也许是最经济的，但这种简单的设计不能通过各种 EMC 测试的概率却非常高，增加一层变为双面板，能提高 PCB 板所涉及信号完整性和电磁兼容能

力方面的性能,相应成本较高。

如果 EMC 测试失败,则需要额外的 EMC 试验费用、重新设计以及为此测试而建立模型,占用工程资源,并导致延迟几周交货时间,很容易使成本大大增加。

因此,设计者在选择单面、双面板或多层板时,一定要通盘考虑。一般应遵循以下原则:

(1) 5/5 规则。在时钟频率超过 5MHz 时,或上升时间小于 5ns 时,需使用多层板。

(2) 当电路工作频率(上升时间)小于音频时(如模拟电路等)。在要求不高的场合,可使用单面板或双面板。

(3) 当生产批量较大,成本控制要求很高,又必须满足相应的规定要求时,应考虑双面板。可以使用栅格型接地系统,接地线路等方法来实现目标,此要求设计者都具有很高的水平。

4.4.3 PCB 地线面的选择与划分

4.4.3.1 PCB 地线设计原则

(1) 不同的地线是为不同性质的电路而设置的,用于为不同性质的信号提供回流通道。因此应按不同性质的电路来确定 PCB 地线。有几种不同性质的电路,就设计相对应的地线系统。

(2) 对于几种不同性质的电路混合在一起的复合电路而言,各种地线的关系应遵守电位基准相同但不互相干扰的原则。

(3) PCB 分层总的原则是信号线一定存在相邻完整的映像回流平面,不可存在地环路。重要信号线和关键信号线要受到保护。

4.4.3.2 PCB 地线面的划分推荐方法

(1) 双面板地线设计准则。数字电路和低频模拟电路接地方法是:地线在印制板上以指叉形状连接各元器件的地线,推荐地线宽度不小于 1mm,母线地线宽度不小于 2.5mm;对于较高频率部分,推荐另一层的相应部分作为参考接地平面。推荐的汇接点在内部电源或外部输入电源的大滤波电容的接地点处;低频模拟电路的汇接点也可选在输入小信号的接地点处。高频不低于 10MHz 模拟电路接地方法采用“#”字形地线网络。

(2) 4 层板地线布局设计准则是信号、地、电源、信号。如果电源有多种规格,可在电源层上划分,地层最好不作划分。

(3) 6 层地线布局设计准则是信号、地层、信号、电源、地层、信号。此种方法可保证信号具有充分的回流平面,且可保证电源和地层之间的电容较大,阻抗较小,有利于电源解耦。

(4) 8 层板地线布局设计准则是信号、地层、信号、地层、电源、信号、地层、信号。

(5) 10 层及以上板地线布局设计准则是信号、地层、信号、信号、地层、电源、信号、信号、地层、信号。

4.4.3.3 PCB 地层分割处理

PCB 地层分割处理必须坚持两个基本原则:①尽可能减小电流环路面积;②系统只采用一个参考平面。

4.4.4 PCB 布线的一般原则

(1) 专用 OV 地线和 Vcc 电源线,线宽应 $\geq 1\text{mm}$ 。

(2) 电源印制线与回线的走线尽可能靠近。

(3) 在 OV 参考平面上尽量少作分割。

(4) 为模拟电路提供专门的 OV 回线。

(5) 检验平行走线上的串扰。若有必要,增加两线之间的距离或在两线之间增加一条 OV 隔离地线。

(6) 考虑对高速逻辑使用改进的电源分配。

(7) 为 PCB 板 OV 回线配置至少为 10% 的彼此隔开的连接器插针。

(8) 为所有连接器件和每一个集成电路的电源和接地走线间安装电容,容量为 0.01~0.1 μF 。

(9) 为消除存在于电源和地平面边缘处的边缘效应,保持 20H 原则,(当使用高速系统时,电源平面可能向空间和附近的电路耦合射频电流,为减小这种耦合效应,要求所有的电源平面物理上都比其相邻的地平面小 20H)一般要求为 3mm。

(10) 采用 3W 原则。走线间距离间隔必须为单一走线宽度的 3 倍。

(11) 高速时钟线应尽量短,走线不换层,不能走直角。

(12) 高速线不应跨越地层隔离缝。

(13) 高速信号两侧应加隔离地线,且高速信号应尽量远离 I/O 端口。

4.4.5 PCB 设计中信号完整性问题

如图 2.8-56 所示,当传输线端接负载阻抗与其特性阻抗匹配时,所传输的信号能量将完全被负载所接收,不会有信号被反射回去,这种情况称负载与传输线是匹配的。如果传输线在终端不匹配,则电路的性能问题和 EMI 就会出现,包括电压过冲、电压负冲、信号上升沿延缓、脉冲波形畸变等。当电路传播延时超过上升或下降时间的 1/4 时,就必须考虑传输线效应。对高速逻辑器件而言,其上升或下降沿在亚纳秒级,PCB 上的走线对高速信号来说就是一种天线,在设计电路时,必须引起足够重视,这就是信号的完整性问题。

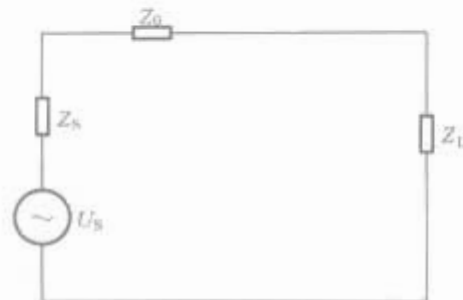


图 2.8-56 典型的传输线系统

当负载不匹配时,反射系数可由下式计算

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.8-57)$$

解决传输线上的反射方法,主要有以下 3 种:

(1) 降低系统频率,以便在另一个信号加到传输线时的反射达到稳态。

(2) 缩短 PCB 走线,以便反射在短时间内达到稳态。

(3) 阻抗匹配,消除反射。

方法(1)和(2)在实际使用中,很难控制及实现,只有方法(3)较好,具有实用价值。

4.4.5.1 源端阻抗匹配

通常用在源端串联电阻的方法,使驱动器的输出阻抗和电阻走线阻抗相匹配,从而实现源反射系数为 0,因此在负载信号上比较干净。

4.4.5.2 终端匹配法

负载端阻抗匹配有以下几种不同的方法(见图 2.8-57)来实现:

(1) 串联匹配。

(2) 并联匹配。

(3) 戴维南匹配。

(4) RC 网络匹配。

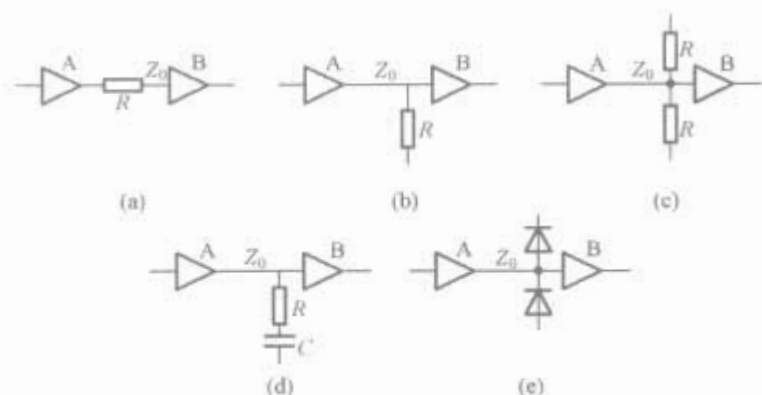


图 2.8-57 几种常用的终端匹配方法

(a) 串联匹配（一般只在源端）；(b) 并联匹配；
(c) 戴维南匹配；(d) RC 匹配；(e) 二极管匹配

(5) 二极管匹配。

4.4.5.3 计算 PCB 上布线长度

设计传输线时，PCB 设计者需要一种方法，在放置元件时能判断出在 PCB 上布线的长度是否被认为是长传输线。常用下式来估算

$$l_{\max} = \frac{t_r}{2t_{pd}} \quad (2.8-58)$$

式中： t_r 为上升沿速率，ns； l_{\max} 为最大布线长度，cm； t_{pd} 为传播时延，ns。

一般取值为微带线拓扑 $l_{\max} = 9t_r$ ，cm，带状线拓扑 $l_{\max} = 7t_r$ ，cm。

4.4.5.4 串扰

串扰是能量从一条线耦合到另一条线。在数字电路系统中，串扰现象相当普遍。在具有许多传输线的 PCB 系统中，大量的传输线之间的耦合会产生两方面的有害影响。首先，串扰会改变总线中受串扰的传输线的特性，对系统的时序及信号完整性带来不利影响；其次，串扰会对其他传输线造成噪声，这样会更进一步降低信号品质以及降低信号的噪声余量。串扰的这些因素影响系统在很大程度上取决于传输线间的数据变换模式、线与线之间的距离以及驱动器的开关速度。

串扰是由互容与互感共同作用产生的结果。串扰的大小取决于相邻传输线间互感与互容的大小，串扰的幅度与传输线间的平行长度成正比，即平行长度越长，串扰就越大。

减小串扰的方法是：

- (1) 在布线条件允许的前提下，尽量拉大传输线间的距离，必须采用 3W（W 为导线宽度）原则（即保证线一线之间有 2 倍线宽）。
- (2) 尽可能地减少相邻传输线间的平行走线的长度。
- (3) 为获得相同特征阻抗，应使布线层与参考平面间的介质层尽可能薄，这样就加大了传输线与参考平面间的耦合度，减少相邻传输线间的耦合。
- (4) 对系统中关键传输线，可以改用差分线传输以减少与其他传输线之间的串扰。
- (5) 相邻两层的信号走线方向应相互垂直，尽可能不要平行走线以减少层间串扰。
- (6) 在保证信号时序的情况下，尽可能选择转换速度低一些的元器件，从而降低串扰。
- (7) 尽量少在表层走线，因为表层线的电场耦合比中间层的要强。
- (8) 尽量将关键信号线夹在两个地平面层内。

4.4.6 PCB 上解耦电容的选择与安装

有源器件在开关时产生的高频开关噪声将沿着电源线传播，数字芯片在状态发生变化时，电源功耗的变化也会在电源和地之间产生噪声，解耦电容用来滤除高频器件在 PCB

电源或芯片电源引脚上的辐射电流，为器件提供一个局域化的直流通路，从而减小电路中电流冲击的峰值。

4.4.6.1 解耦电容的确定

在选择解耦电容时，常用下式来确定其值

$$C = \Delta I \frac{\Delta t}{\Delta U} \quad (2.8-59)$$

式中： ΔI 为开关器件开通和截止两种状态下流过电源引脚的电流差值； Δt 为开关时间，是器件输出脉冲信号的上升沿或下降沿； ΔU 为允许电源电压值的变化。

常用陶瓷电容来做解耦电容，其值通常为小于 $0.1\mu\text{F}$ 。

4.4.6.2 解耦电容的安装

解耦电容距离芯片越近，其补充电流环路面积就越小，电路对外辐射也小。因此，解耦电容应直接安装在芯片的电源脚和地脚之间。

4.4.7 滤波电路的使用

通常的 PCB 板都有电源电路。电源普遍采用开关技术，因此电源工作时会产生高频噪声；另外，负载频繁变化也会导致噪声的产生，因此，在电源部分采用滤波措施十分必要。图 2.8-58 所示为电源滤波器原理图，其中 L_1 、 L_2 为共模电感； C_1 、 C_4 为差模滤波器电容； C_2 、 C_3 为共模滤波电容； R 为放电电阻。

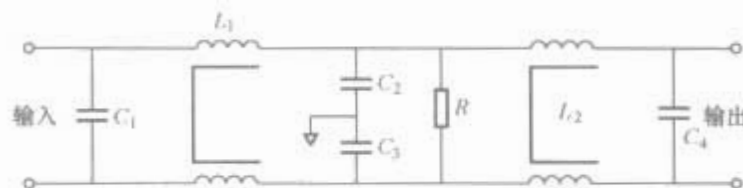


图 2.8-58 一般 PCB 板上用的电源滤波器原理图

在使用滤波器时，应注意以下几点：

- (1) 滤波器的输入/输出线要分开，最好分别从印制板的两边引出，以免形成相互耦合，且引线要尽可能短。
- (2) 滤波器必须良好接地，只有良好的接地，滤波器的共模电容才能起作用。

对于 I/O 印制线在连接器端口处，应加高频解耦电容，且该电容应置于靠近连接器处。

4.4.8 PCB 上 I/O 端口的处理及要求

不可能所有的 PCB 上都没有对外接口电路，一般系统正是通过这些接口进行工作的。这些接口的稳定性对系统的可靠性影响特别大，因此，在处理 PCB 上的 I/O 端口时，应特别注意以下几点：

- (1) 所有的连接器最好都放在印制电路板的一侧，尽量避免从两侧引出电缆。
- (2) 不要让高速数字集成芯片靠近连接器。当高速数字集成芯片与连接器之间没有直接的信号交换时，高速数字集成芯片应安排在远离连接器处。
- (3) 输入/输出 (I/O) 驱动器应紧靠连接器。I/O 信号从连接器引入后应马上进入 I/O 驱动器，不要在印制板上传输过长的距离，以免耦合上干扰信号。
- (4) I/O 轨线在连接器端口处应加高频解耦电容。一般情况下，I/O 信号的频率要低于时钟频率，所以高频解耦电容的选择应能保证 I/O 信号正常传输，并能滤除高频时钟频率及其谐波。该高频解耦电容是为了抑制差模干扰，包括沿 I/O 线进入印制板和从印制板出去的干扰，故该电容应接在 I/O 线的信号线和地线之间。

(5) I/O 端口通过隔离，可很好地防止外界干扰，也可大大降低对外的发射。常可采用以下措施：

1) 差分电路。由于差分电路是按加于电路两输入端的电压差而工作的,当干扰噪声等量加在它的输入端时,根据差分电路的工作原理,其输出将不存在干扰,故利用差分电路可减少接地电路干扰。

2) 变压器隔离。采用隔离变压器可起到抑制地环路干扰的作用。但在 PCB 布线时,为防止变压器的磁场耦合到下面的地、电源平面上,一般要求将隔离变压器下面的电源、地层平面都挖空,且变压器下面不能有任何信号线穿越。

3) 共模电感抑制。共模电感对地环路干扰电流呈高阻抗,从而起到减弱干扰的作用。

4) 光电耦合器隔离。光电耦合器能很好地切断地环路,特别适用于数字电路。

4.4.9 PCB 板的安装

设计良好的 PCB 板也需有一个良好的安装方式,才能真正发挥作用。安装 PCB 板时,必须注意以下事项:

(1) PCB 板上的安装孔,其周围的印制线与紧固件之间的距离,必须大于或等于 3mm,否则很难通过静电放电试验。

(2) PCB 板上裸露金属元器件或管脚,必须与机箱外壳之间留有一定的间隙,此间隙亦应大于 3mm。

(3) 将 PCB 板四周边框整平时,应注意不要将多层板的铜箔显露出来,以便给静电放电试验留下隐患。

(4) PCB 板插件面板应于机箱保持良好的接触,确保其导电的连续性。不可在面板内侧面刷漆等。

(5) 当 PCB 板周围存在强干扰源时,必须对 PCB 板采用屏蔽措施,以保护 PCB 板免受干扰;也可将强干扰源屏蔽起来,以减弱其对外的干扰。

4.4.10 PCB 板上散热元件的处理

PCB 板上的散热器件,如果不作处理,很有可能成为干扰源的发射天线,对外产生很强的发射。对于电源模块上的散热器件,金属外壳必须通过一条粗而短的接地线,接至机壳地上。周围不能与其他印制线挨得很近,否则很难通过静电放电测试。

对于集成芯片所带的散热器件和工作时钟频率 75MHz 或更高频率的超大规模集成电路,由于元件消耗的直流功率超过了 15W 或更多,因此需要使用金属散热器来进行冷却处理,此散热器被称为接地散热器。

使用金属散热器与在产品中放置一个单纯的天线并将整个时钟谐波辐射出去的作用是一样的。因此散热器必须良好接地。散热器尺寸越大,辐射效率就越高。

散热器件通过所有 4 个侧面的金属连接与 PCB 的 OV 参考电位面(接地层)相连,使用从 PCB 至散热器的防扰篱笆(类似于垂直的汇流条)将芯片封装起来,该篱笆将会在芯片周围产生法拉第屏蔽,从而防止芯片内部的共模噪声辐射到空间或耦合到相邻的元件、电缆、外围设备或孔缝中。

总而言之,使用接地散热器可产生如下作用:

(1) 降低芯片内部产生的热量。

(2) 防止芯片内部时钟电路产生的射频能量辐射至空间或耦合到相邻电路。

(3) 消除在封装芯片内通过芯片与地之间的交流耦合射频能量而直接产生共模射频电流的共模去耦电容器。

5 试验

电磁兼容测试贯穿在产品的开发、设计、生产、使用和

维护的整个周期,对设备达到电磁兼容起到至关重要的作用。

电磁兼容测试按其目的可分为诊断测试和达标测试。诊断测试的目的是调查产生电磁兼容问题的原因,确定产生噪声和被干扰的具体部位,从而为采取抑制措施作准备;达标测试是根据有关电磁兼容标准规定的方法对设备进行测试,评估其是否达到标准所提出的要求,产品在定型和进入市场之前必须进行达标测试,作为产品型式试验的一部分。

电磁兼容标准可以为基础标准、通用标准、产品类标准以及专用产品标准。

基础标准是制定其他 EMC 标准的基础。它描述了 EMC 现象,规定了电磁骚扰发射和抗扰度的测试方法、测试设备和布置,同时定义了试验等级和性能判据,但并不涉及具体的产品。

通用标准是按产品使用的环境来划分的。环境被划分为民用和商用环境、轻工业环境、典型的工业环境、严酷的工业环境以及特殊的工业环境 5 类。通用标准规定了设备应该在哪些端口作发射及抗扰度试验,包括被试设备的交直流电源端口、信号和数据线端口、机壳、接地点等;而且还规定了可以依据的基础标准。

产品类标准和专用产品标准是针对某种产品系列和专用产品的 EMC 测试而制定的,它往往引用了基础标准的内容,同时套用通用标准,根据产品的特殊性对测试作出了更详细的规定,如试验等级、测试设备的要求等。IEC 60571 及铁标 TB/T 3021《机车车辆电子装置》以及 EN 50121 及 IEC 62236 铁路应用电磁兼容均属于产品类标准。

5.1 IEC 60571 及 TB/T 3021 标准

IEC 60571 及 TB/T 3021 标准,是专门用于铁道机车车辆电子装置的产品类标准,标准中详细规定了电子装置环境试验的要求。试验分为型式试验、例行试验及研究性试验。其中在型式试验中,涉及了电磁兼容试验。在型式试验中,将电磁兼容试验作为环境试验的一个子项目。而在 IEC 60571—2001 标准中,电磁兼容试验已与 EN 50121—2000 等同接轨。

5.2 EN 50121 及 IEC 62236 标准

IEC 62236 标准等效采用了 EN 50121 标准,因此这里重点介绍 EN 50121 系列标准。

EN 50121 标准共分为 5 个部分,它们分别是:

EN 50121—1 《铁路应用 电磁兼容 第一部分:总则》

EN 50121—2 《铁路应用 电磁兼容 第二部分:整个铁路系统对外界的发射》

EN 50121—3—1 《铁路应用 电磁兼容 第三部分之一:机车车辆—列车及整车》

EN 50121—3—2 《铁路应用 电磁兼容 第三部分之二:机车车辆—设备》

EN 50121—4 《铁路应用 电磁兼容 第四部分:信号及通信设备的发射及抗扰度》

EN 50121—5 《铁路应用 电磁兼容 第五部分:地面电源装置及设备的发射及抗扰度》

其中 EN 50121—1 及 EN 50121—2 为类似于通用标准的产品类标准,而 EN 50121—3—1, EN 50121—3—2, EN 50121—4 及 EN 50121—5 为产品标准。

EN 50121—1 主要概述了铁路的供电模式、主要干扰源等以及抗扰度、试验的评判依据等。由于本标准范围内设备的多样性及差异性,因此很难为评价抗扰度试验结果制定精确的判定准则。该标准中定义了 A、B、C 的性能评定准则。

性能评定 A。在试验过程中和试验后,设备能按预期要求连续工作。当设备按预期使用时,设备的性能没有下降或功能丧失不允许低于制造商规定的相应性能等级。可以用允许的性能降低来代替性能等级。如果制造商没有规定最低性能等级和允许的性能降低,两者的任何一个可从产品的介绍和文件中导出,也可从设备按预期使用时用户相应的要求导出。

性能评定 B。试验后设备能按预期要求连续工作。当设备按预期使用时,设备的性能没有下降或功能丧失不允许低于制造商规定的相应性能等级,可以用允许的性能降低来代替性能等级。试验过程中是允许性能下降的,但不允许实际运行状态或存储数据有所改变。如果制造商没有规定最低性能等级和允许的性能降低,两者的任何一个可从产品的介绍和文件中导出,也可从设备按预期使用时用户相应的要求导出。

性能评定 C。只要设备功能可自行恢复或通过操作控制器来恢复,允许出现暂时的功能丧失。

EN 50121—2 主要讲述了整个铁路系统的对外发射,定义了 9kHz~1GHz 频率范围内发射限值及测试方法,限值曲线如图 2.8-59 所示。图 2.8-60 所示为 9kHz~30MHz 的磁场强度的测试场地布置,图 2.8-61 所示为 30~300MHz 电场强度的测试场地布置。图 2.8-62 所示为 30MHz~1GHz 电场强度的测试场地布置。

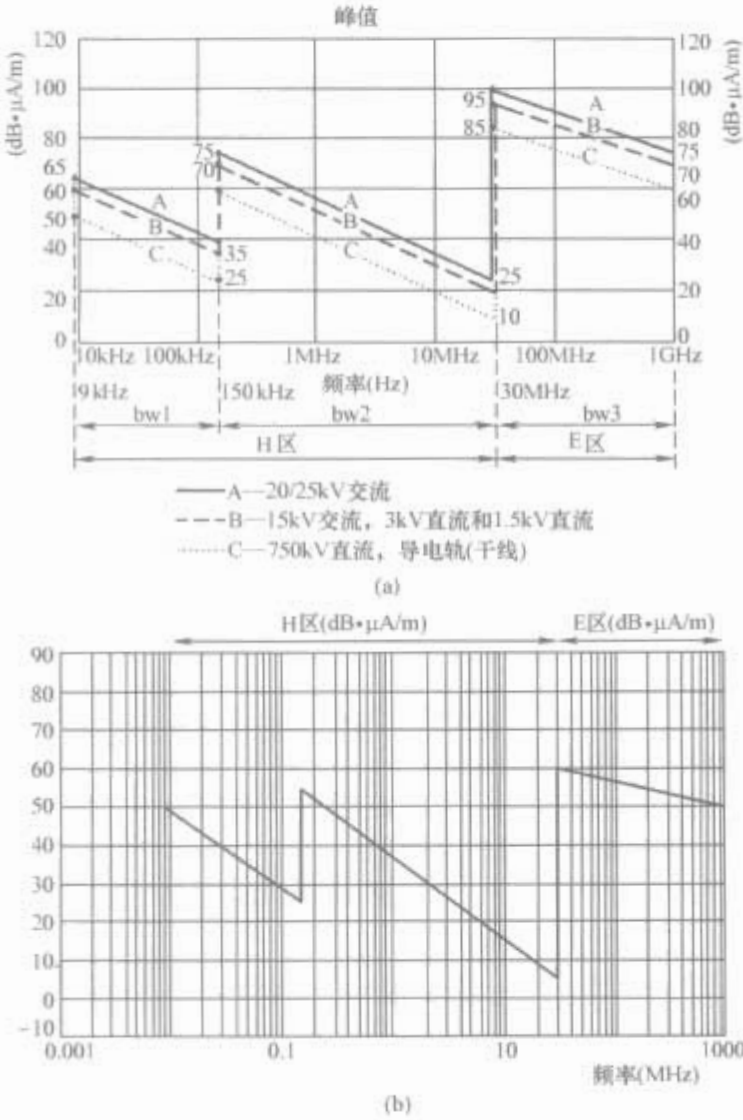


图 2.8-59 铁路系统对外发射限值曲线
(a) 9kHz~1GHz 频率范围;
(b) 0.001~1000MHz 范围 (变电站)

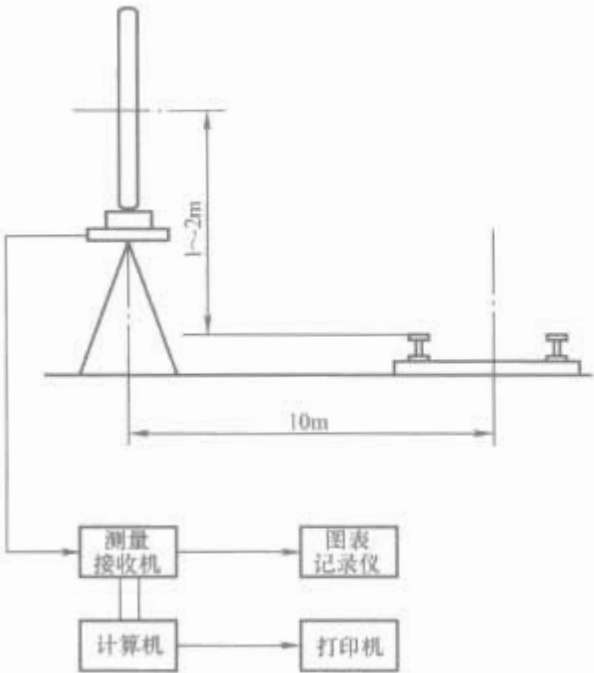


图 2.8-60 9kHz~30MHz 频带内磁场测量天线的位置

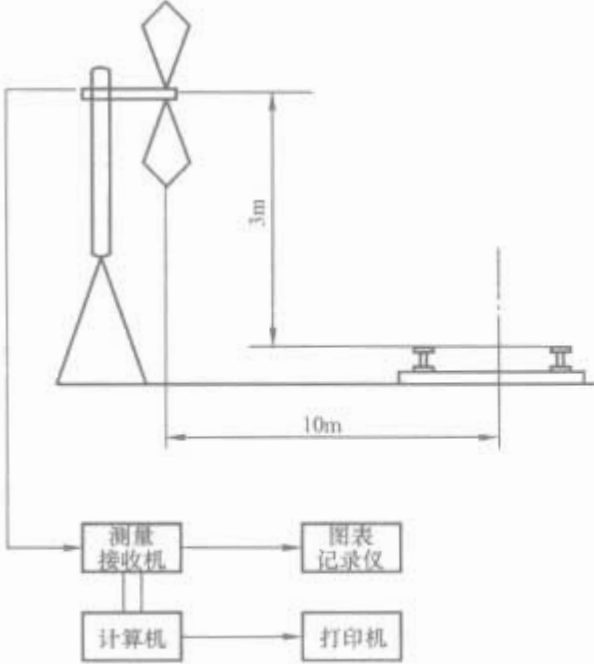


图 2.8-61 在 30~300MHz 频带内电场测量天线位置 (垂直极化)

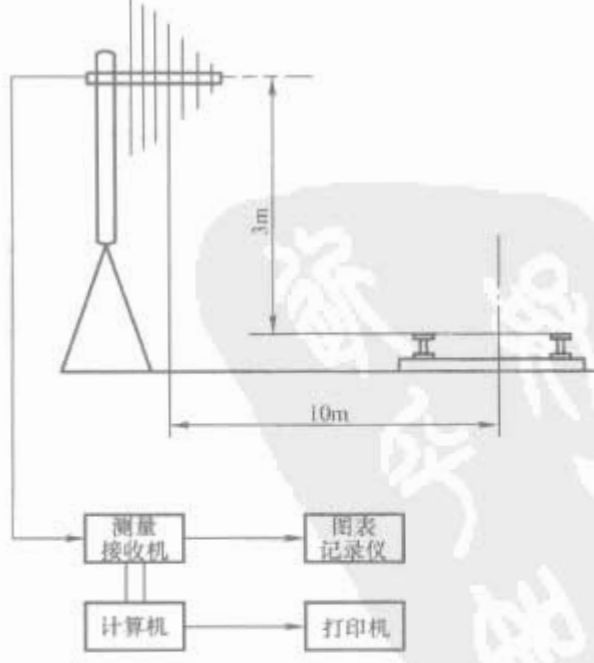


图 2.8-62 在 300MHz~1GHz 频带内电场测量天线位置 (垂直极化)

EN 50121—3—1 主要描述了列车和机车车辆对外发射的限制要求及测试场地要求;同时详细规定了测试方法及被

测试列车和车辆的状态。图 2.8-63 所示为静态试验的限制值曲线；图 2.8-64 所示为慢行试验的限制曲线。

EN 50121—3—2 主要描述了机车和车辆上使用的设备，对外发射及抗扰度的要求，已将该部分转化为 TB/T 3034—2002《机车车辆电气设备电磁兼容性试验及其限值》。该标准详细规定了 2 项对外发射的限制要求及 6 项抗扰度试验的要求。

EN 50121—4 规定了信号及通信设备的发射及抗扰度的要求。根据不同的端口，规定了相应的抗扰度试验项目及要求，同时对信号通信设备的对外发射要求也给出了限制值。

EN 50121—5 规定了地面电源装置及设备的发射及抗扰度要求。根据设备的不同端口，详细地规定抗扰度的试验项目及要求，同时也规定了设备对外发射的限制要求。

5.3 试验要求

产品使用场合不同，环境要求也不同，所采用的标准也不一样。由于标准不一样，试验的项目要求、评判依据亦不尽相同。EN 50121 及 IEC 62236 条款分别详细地规定了从地面到车上的电气设备及信号、通信设备的试验要求，并对列车及整个铁路系统的对外发射作了明确的规定及要求。

5.3.1 试验项目及要求

试验项目及要求见表 2.8-12～表 2.8-15。

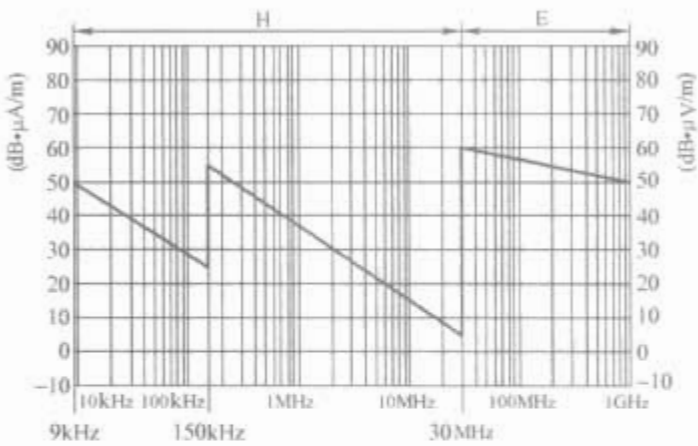


图 2.8-63 列车辐射发射静态试验的限值

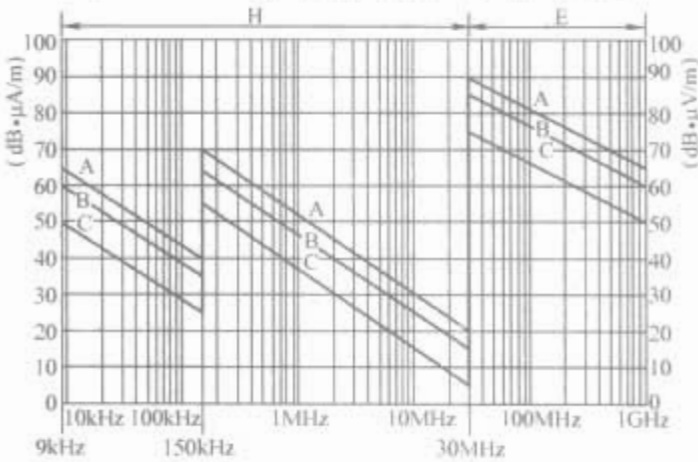


图 2.8-64 列车辐射发射慢行试验的限值

表 2.8-12 地面设备及车载电气设备、信号、通信设备的抗扰度试验项目及要求			
端 口	EN50121—3—2	EN50121—4	EN50121—5
机箱端口	1. 射频电磁场辐射抗扰度 80MHz~1GHz 10V/m 1kHz, 80%, AM (调幅) 性能评定 A 2. 静电放电抗扰度 接触放电 6kV 空气放电 8kV 性能评定 B	1. 射频电磁场辐射抗扰度 80MHz~1GHz 1kHz, 80%, AM (调幅), 10V/m 性能评定 A 2. 静电放电抗扰度 接触放电 6kV 空气放电 8kV 性能评定 B 3. 射频电磁场辐射抗扰度 900MHz 20V/m 脉冲调制 性能评定 A 4. 工频磁场抗扰度 50Hz, 100A/m 性能评定 A 5. 脉冲磁场抗扰度 300A/m 性能评定 B	1. 射频电磁场辐射抗扰度 80MHz~1GHz 1kHz, 80%, AM (调幅), 10V/m 性能评定 A 2. 静电放电抗扰度 接触放电 6kV 空气放电 8kV 性能评定 B 3. 射频电磁场辐射抗扰度 900MHz 10V/m 未调制 性能评定 A 4. 工频磁场抗扰度 50Hz, 100A/m 性能评定 A
I/O 端口信号、 通信、控制端口	1. 电快速瞬变脉冲群抗扰度 2kV 5kHz rep 性能评定 A 2. 射频场感应的传导骚扰抗扰度 0.15~80MHz 1kHz, 80% AM, 10V 性能评定 A	1. 电快速瞬变脉冲群抗扰度 2kV, 5kHz rep 性能评定 A 2. 射频场感应的传导骚扰度 0.15~80MHz 1kHz, 80% AM, 10V 性能评定 A 3. 浪涌抗扰度 线—线 1kV 线—地 2kV, 1.2/50, $T_r/T_h\mu s$ 性能评定 B	1. 电快速瞬变脉冲群抗扰度 2kV, 5kHz rep 性能评定 A 2. 射频场感应的传导骚扰度 0.15~80MHz 1kHz, 80% AM, 10V 性能评定 A

续表

端 口	EN50121—3—2	EN50121—4	EN50121—5
蓄电池、直流、交流电源输入端口	1. 电快速瞬变脉冲群抗扰度 2kV, 5/50 (T_r/T_h) ns 5kHz rep 性能评定 A 2. 浪涌抗扰度 线—线 1kV 线—地 2kV, 1.2/50 (T_r/T_h) μ s 性能评定 B 3. 射频场感应的传导骚扰抗扰度 0.15~80MHz 1kHz, 80%, AM, 10V 源阻抗 150 Ω 性能评定 A 4. 电压变化、中断抗扰度 中断: 30ms 变化: 60% U_n \nearrow U_n 100ms U_n \searrow 125% U_n 100ms 性能评定 A	1. 电快速瞬变脉冲群抗扰度 2kV, 5/50 (T_r/T_h) ns 5kHz rep 性能评定 A 2. 浪涌抗扰度 线—线 1kV 线—地 2kV, 1.2/50 (T_r/T_h) μ s 性能评定 B 3. 射频场感应的传导骚扰抗扰度 0.15~80MHz 1kHz, 80%, AM, 10V 源阻抗 150 Ω 性能评定 A	1. 电快速瞬变脉冲群抗扰度 直流/交流 4kV/4kV 5/50 (T_r/T_h) ns 5kHz rep 性能评定 B 2. 浪涌抗扰度 直流/交流 线—线 1kV/2kV, 1.2/50 (T_r/T_h) μ s 线—地 2kV/4kV 性能评定 B 3. 射频场感应的传导骚扰抗扰度 0.15~80MHz; 1kHz, 80%, AM, 10V; 源阻抗 150 Ω 性能评定 A
接地端口		1. 射频场感应的传导骚扰抗扰度 0.15~80MHz 1kHz, 80%, AM, 10V 源阻抗 150 Ω 性能评定 A 2. 电快速瞬变脉冲群抗扰度 1kV 5kHz rep 5/50 T_r/T_h ns 性能评定 A	射频场感应的传导骚扰抗扰度 0.15~80MHz 1kHz, 80%, AM, 10V 源阻抗 150 Ω 性能评定 A
测量、控制端口			1. 射频场感应的传导骚扰抗扰度 0.15~80MHz 1kHz, 80%, AM, 10V 源阻抗 150 Ω 性能评定 A 2. 浪涌抗扰度 线—线 1kV 1.2/50 (T_r/T_h) μ s 线—地 2kV 性能评定 B 3. 电快速瞬变脉冲群抗扰度 2kV 5/50 (T_r/T_h) ns 5kHz rep 性能评定 B 4. 阻尼振荡抗扰度 线—线 1kV 线—地 2.5kV 性能评定 B

表 2.8-13 车载设备、通信装置及地面设备的对外发射要求

项 目	EN50121—3—2	EN50121—4	EN50121—5
传导干扰	0.15~0.5MHz 99dB $\cdot\mu$ V QP 0.5~30MHz 93dB $\cdot\mu$ V QP	0.15~0.5MHz 79dB $\cdot\mu$ V QP 0.5~30MHz 73dB $\cdot\mu$ V QP	0.15~0.5MHz 79dB $\cdot\mu$ V QP 0.5~30MHz 73dB $\cdot\mu$ V QP
辐射干扰	30~230MHz 40dB $\cdot\mu$ V/m QP 230~1000MHz 47dB $\cdot\mu$ V/m QP 10m	30~230MHz 40dB $\cdot\mu$ V/m QP 230~1000MHz 47dB $\cdot\mu$ V/m QP 10m	30~230MHz 40dB $\cdot\mu$ V/m QP 230~1000MHz 47dB $\cdot\mu$ V/m QP 10m

表 2.8-14 TB/T 3021—2001 轨道机车车辆
电子装置电磁兼容试验项目及要

项 目	要求及严酷度
传导干扰	0.15~0.5MHz 79dB·μV QP 0.5~30MHz 73dB·μV QP
辐射干扰	30~230MHz 40dB·μV/m QP 230~1000MHz 47d·μV/m QP 10m
静电放电抗扰度	接触放电 6kV 空气放电 8kV 性能评定 B
射频电磁场辐射抗扰度	80MHz~1GHz 10V/m 1kHz, 80%, AM 性能评定 A
电快速瞬变脉冲群抗扰度	2kV 5/50, (T _r /T _h) ns 5kHz rep 性能评定 A
浪涌抗扰度	线—线 1kV 2Ω 线—地 2kV 12Ω 1.2/50, (T _r /T _h) μs 性能评定 B
射频场感应传导骚扰抗扰度	0.15~80MHz 源阻抗 150Ω 1kHz, 80%, AM, 10V 性能评定 A
电压变化、中断抗扰度	中断: 30ms 变化: U _n ↘0.6U _n U _n ↗1.25U _n 100ms 性能评定 A

表 2.8-15 整个铁路系统及列车车辆对外发射

标 准	要求 (限制曲线)
IEC62236—2 整个铁路系统的对外发射	限值曲线如图 2.8-59 所示
IEC62236—3—1 列车、车辆对外发射	限制曲线如图 2.8-63、图 2.8-64 所示

5.3.2 要求

通常不可能对设备的每项功能都进行测试。试验应在由制造商认定的典型运行工况下进行，以便经研究认为与正常应用工况一致的频带上产生最大的发射或对噪声有最大敏感度。制造商应在试验大纲中定义试验工况。

如果设备是系统的一部分，就需连接辅助设备。按照 GB 9254—1998《信息技术设备的无线骚扰限值和测量方法》的要求，设备应在连接了测试端口所必要的辅助设备的最小系统配置情况下进行试验。

试验的系统配置和运行模式应在试验大纲中指明，试验过程中的实际状况应在试验报告中予以准确说明。

如果设备有大量类似的端口或带许多类似连接的端口，那么应选择足量的端口，以模拟实际的运行条件，确保涵盖

所有不同类型的终端。除非另有规定，否则应选择至少 4 个端口或总数的 20%。

试验应在设备规定的工作范围内以额定的电源电压进行。

超过 50kVA 的主变流器及辅助变流器不应在实验室内进行单独测试，应作为车辆或机车的一部分作整体测试。除非另有规定，电磁兼容性试验应为型式试验。如有下列情况之一，就必须做型式试验。

- (1) 对装置进行了改进而可能影响其功能和操作方法时。
- (2) 型式试验或例行试验失败或参数改变时。
- (3) 停产 5 年以上恢复生产时。
- (4) 制造地点改变时。

5.3.3 产品评定判据

产品评定判据分为 A、B、C 3 个等级，铁路产品都必须达到 B 等级以上。A、B、C 3 个等级的详细描述参见 EN50121—1 标准。

产品在执行标准时，其试验项目都必须达到标准规定的要求时，方算合格。例如，车载设备，须符合 EN50121—3—2 标准要求，该标准中规定了产品必须做 8 项试验。其中对外发射干扰 2 项，抗干扰试验 6 项。只有这 8 项试验都符合标准要求后，产品才算满足电磁兼容的要求。

5.4 试验方法

不同的测试仪器，被试设备布置的差异，测试场地的不规范，均可能对产品的测试结果产生极大的影响。为了使同一产品在不同实验室都有一致的结果，确保试验结果具有可比性及重复性。电磁兼容对试验方法、仪器设备及场地要求都作了明确的规定。

5.4.1 试验设备及仪器要求

在电磁兼容性测试中，除通用测量仪器外，还需用到许多专用仪器或装置。为了使测量结果统一，国际上对关键测试仪器及设备的性能、规格、参数等都作了详细的规定，必须满足 CISPR16—1《无线电骚扰和抗扰度测量设备规范》的要求。

5.4.1.1 EMI 测量常用仪器及设备

(1) 电磁骚扰测量仪。电磁骚扰测量仪实际上是一台超外差式选频电压表。图 2.8-65 所示为电磁骚扰测量仪电路原理框图。骚扰波形通常由许多频率组成，骚扰测量仪可用来测量这些频率的电压幅值。

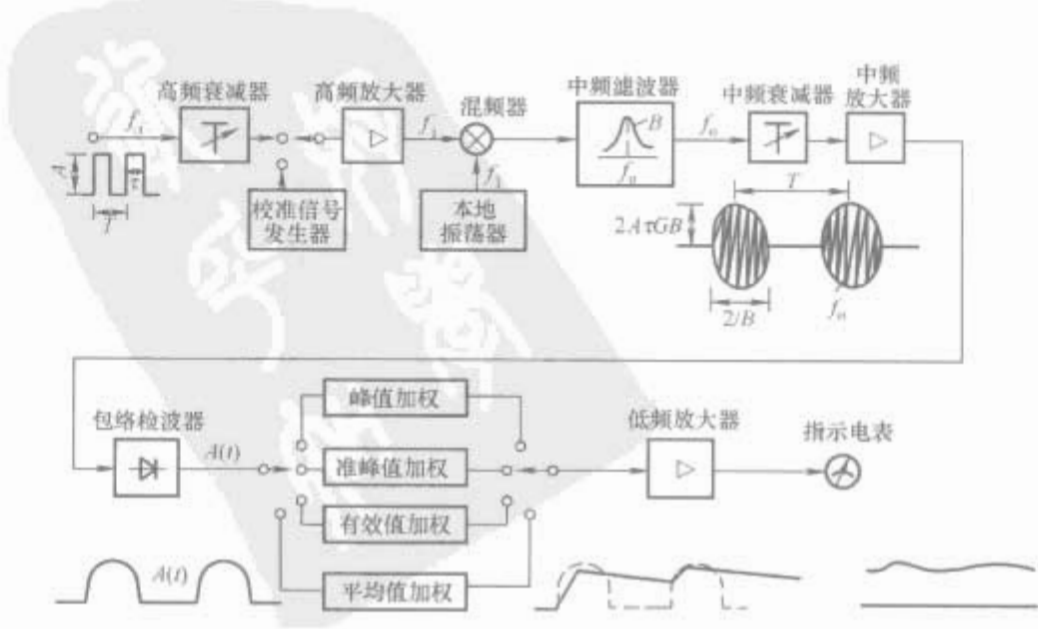


图 2.8-65 电磁骚扰测量仪电路原理框图

骚扰测量仪必须具备的检波方式是准峰值、峰值、平均值和均方根检波。骚扰测量仪不仅可以测量连续信号，而且还可以测量脉冲信号，这是它区别于普通电压表的最大不同之处，在 CISPR16—1 及 GB/T6113.1 中规定了骚扰测量仪的技术性能指标见表 2.8-16、表 2.8-17 和表 2.8-18。

各频率段的范围为：A 频段 9~150kHz，B 频段 0.15~30MHz，C 频段 30~300MHz，D 频段 300~1000MHz。

表 2.8-16 骚扰测量仪的 4 大类指标

指标名称	频 段		
	A	B	C 及 D
6dB 处的带宽 (kHz)	0.2	9	120
准峰值电压表的充电时间常数 (ms)	45	1	1
准峰值电压表的放电时间常数 (ms)	500	160	550
临界阻尼指示仪器的机械时间常数 (ms)	160	160	100
检波器前电路的过载系数 (高于使指示器产生最大偏转的正弦波信号电平) (dB)	24	30	43.5
接入检波器与指示仪器这之间直流放大器的过载系数 (高于相应于指示仪器满刻度偏转的直流电压电平) (dB)	6	12	6

表 2.8-17 骚扰测量仪的绝对脉冲特性

频 段	A (μVs)	B (MHz)	C (Hz)
A	13.5	0.15	25
B	0.316	30	100
C	0.044	300	100
D	0.044	1000	100

表 2.8-18 骚扰测量仪的相对脉冲特性

重复频率 (Hz)	脉冲的相对等效电平 (dB)		
	A 频段	B 频段	C 和 D 频段
1000	—	-4.5±1.0	-8.0±1.0
100	-4.0±1.0	0 (基准)	0 (基准)
60	-3.0±1.0	—	—
25	0 (基准)	—	—
20	—	+6.5±1.0	+9.0±1.0
10	+4.0±1.0	+10.0±1.5	+14.0±1.5
5	+7.5±1.5	—	—
2	+13.0±2.0	+20.5±2.0	+26.0±2.0
1	+17.0±2.0	+22.5±2.0	+28.0±2.0
孤立脉冲	+19.0±2.0	+23.5±2.0	+31.0±2.0

(2) 线路阻抗稳定网络 (LISN)。进行电源端传导骚扰电压测试时，为使测量结果反映实际使用情况并有可比性，必须在被试设备与其电源端子间接入统一的线路阻抗稳定网络，又称人工电源网络。其主要有以下 3 个作用，其电路原理图如图 2.8-66 所示。

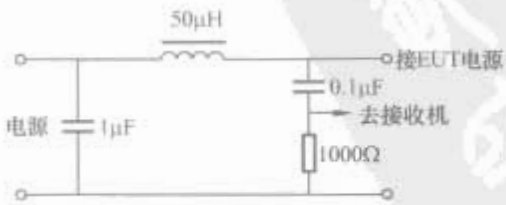


图 2.8-66 线路阻抗稳定网络原理图

- 1) 为被试设备提供稳定的高频阻抗。
 - 2) 实现被试设备与电网之间的射频隔离。
 - 3) 为接收机提供被试设备的传导干扰信号。
- (3) 测量天线。天线用来接收骚扰电磁场，把场强转变成电压，骚扰测量的是转变后的电压值，故测量仪的读数只有加上天线系数后才能得到骚扰场强。电磁骚扰测量中常用

的天线为宽带天线（见图 2.8-67），便于自动化扫频测量，一般用双锥天线（30~300MHz）、对数周期天线（200~1000MHz）和混合宽带天线（30~1000MHz）。1GHz 以上的频率常用喇叭天线，喇叭天线具有极强的方向性。由于骚扰场强的水平极化分量和垂直极化分量是不同的，故测量时应把天线水平放置测量水平极化，垂直放置测垂直极化。整个测试系统是同轴传输系统，应保持阻抗匹配，即天线的阻抗、同轴电缆的特性阻抗和干扰测量仪的输入阻抗都相等，一般为 50Ω。

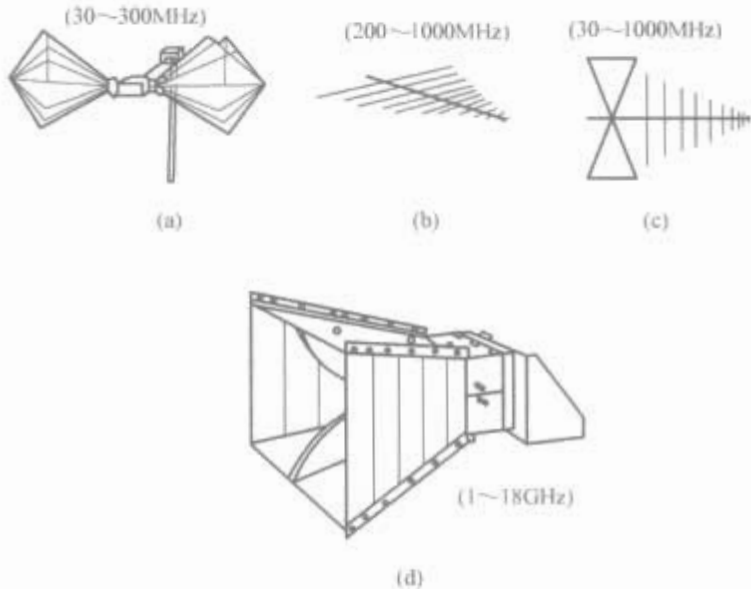


图 2.8-67 EMI 测量用的几种天线
(a) 双锥天线；(b) 对数周期天线；(c) 混合宽带天线；
(d) 喇叭天线

(4) 电压探头。电压探头常用于需对不易接近的单根导线进行传导发射测量，要求电压探头工作频率有足够的带宽，并具备高输入阻抗的特性。图 2.8-68 所示为电压探头原理图。电压探头常与输入阻抗为 50Ω 的干扰测量仪配套使用。探头中串联的耦合电容起着高通滤波器的作用，使直、交流电源被衰减，而频率较高的电磁干扰则得以通过。其最小输入阻抗为 1.5kΩ，最大分布电容为 10pF，探头频率范围为 10kHz~30MHz。

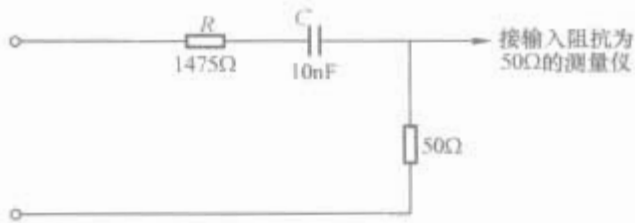


图 2.8-68 电压探头原理图

(5) 功率吸收钳。当所测频率升高至 30MHz 以上时，人工电源网络内的电感、电容器的分布参数影响明显加大，使其不能起到良好的隔离和滤波作用，测量误差明显增加。实际上，高频骚扰是沿着电源线向外“辐射”，因此常采用功率吸收钳进行测量。测量虽然在电源线上进行，但实际上是辐射测量。功率吸收钳结构原理见图 2.8-69。其中 C 是电流探头，它包括铁氧体环和探测线圈；D 是铁氧体环组，用于隔离 EUT 和电网；F 也为铁氧体环组，其作用为抑制电源线和测量线之间的耦合。功率吸收钳的测试频率范围为 30~300MHz，其测试应在屏蔽室内进行。电源线长度应大于 6m，即大于 30MHz 的半波长。吸收钳应沿着电源线移动，找出最大辐射点，因为电磁波在导线上是以驻波形式出现的，为进一步防止电网骚扰的入侵，以影响测量结果，应在电网端再加一辅助吸收钳 F，它也由铁氧体磁环组成。EUT 的实际骚扰功率 P 应为骚扰测量仪测得的功率 P_r 和插

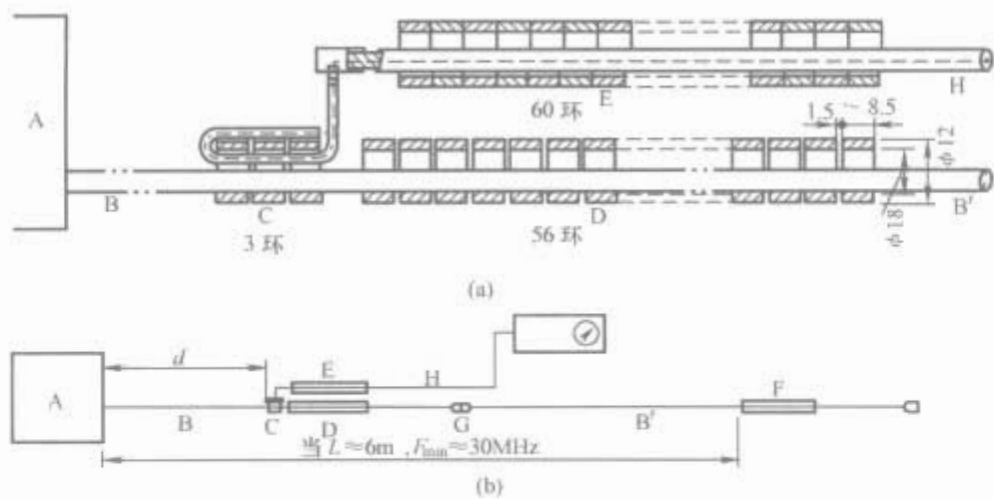


图 2.8-69 30~300MHz 功率吸收钳测试
(a) 功率吸收钳的结构；(b) 30~300MHz 功率测量布置

入损耗 L 之和，即为 $P=P_r+L$ 。

5.4.1.2 常用的抗扰度试验设备及仪器

(1) 信号发生器。能覆盖所有须考核的频率，并能被 1kHz 的正弦波进行幅度调制，调制深度 80%。应具有慢于 $1.5 \times 10^{-3} \sim 10$ 倍频程/s 的自动扫描功能。如果带有频率合成器，则应具有频率步进和延时的程控功能，也应具有手动设置功能。

(2) 功率放大器。对信号进行放大（调制和未调制信号）并提供天线输出所需的场强电平。放大器产生的谐波失真电平应比载波电平低 15dB。

(3) 发射天线。能够满足频率特性要求的双锥形、对数周期或其他线性极化天线系统。

(4) 电快速瞬变脉冲群发生器。衡量试验发生器性能的主要指标有 3 个：单个脉冲波形、脉冲的重复频率和输出电压峰值。图 2.8-70 所示为快速瞬变脉冲群示意图和 GB/T 17626.4

(5) 浪涌组合波信号发生器（1.2/50~8/20μs）。能产生 1.2/50μs 开路电压波形，8/20μs 短路电流波形的信号发生器被称为组合波浪涌信号发生器。开路电压波形与短路电流波形要求如图 2.8-71 所示。

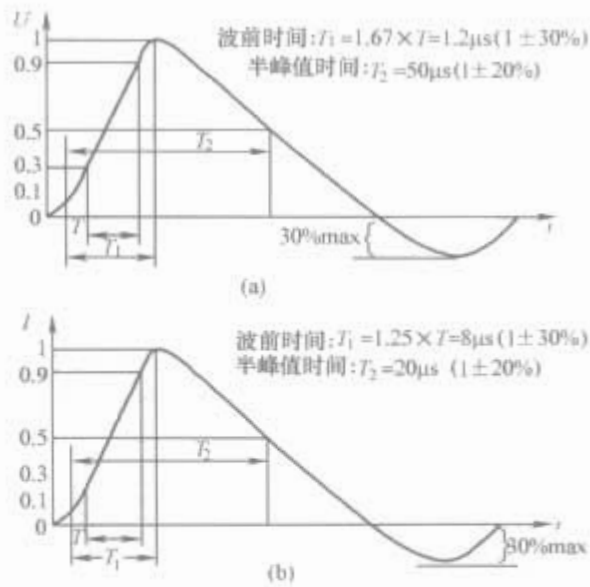


图 2.8-71 浪涌开路电压波形及短路电流波形
(a) 1.2/50μs 开路电压波形；(b) 8/20μs 短路电流波形

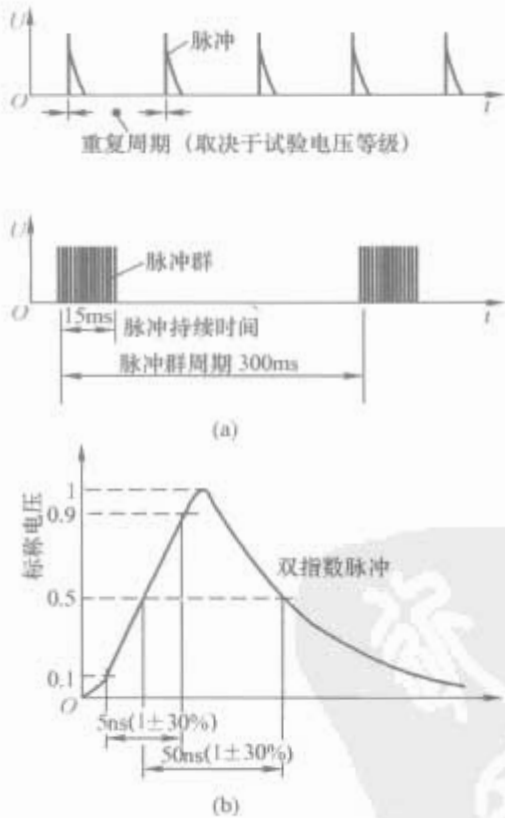


图 2.8-70 快速瞬变脉冲群示意图和单个脉冲波形
(a) 快速瞬变脉冲群示意图；(b) 接 50Ω 负载时单个脉冲的波形

要求试验发生器输出到 50Ω 负载上的单个波形。单个脉冲的重复频率在 GB/T 17626.4 中规定重复频率为 5kHz 和 2.5kHz。试验发生器的开路输出电压范围应至少 0.25（1~10%）~4（1+10%）kV。在对保护接地进行试验时，试验发生器的输出处于短路状态，因此发生器应能在短路的条件下工作。

(6) 静电放电试验发生器。该试验发生器主要包括充电电阻 R_c 、储能电容器 C_s 、分布电容 C_d 、电压指示器、放电开关和更换的放电电极头。试验发生器的原理简图如图 2.8-72 所示。

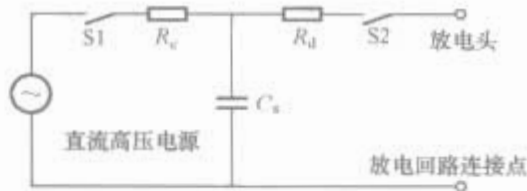


图 2.8-72 静电放电试验发生器原理简图
($R_c=50\sim100\text{M}\Omega$, $R_d=330\Omega$, $C_s=150\text{pF}$)

图 2.8-73 所示为静电放电发生器输出电流的典型波形。

5.4.2 试验场地要求与试验布置

5.4.2.1 试验场地要求

(1) 开阔场。标准规定的室外测试场地，俗称开阔场。在开阔场地，至少应在椭圆范围内没有任何可能反射电磁波的物体存在。被试设备和天线应放置于椭圆的 2 个焦点上，骚扰测量仪则放在椭圆外，地面应铺设金属板或金属栅网，板或网的连接处不应有电不连续点。缝直径应小于 0.1λ ， λ 为拟测试的最高频率的波长。开阔场的环境噪声越小越好，

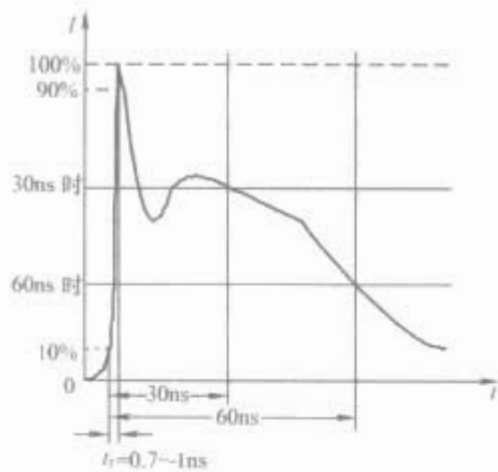


图 2.8-73 静电放电发生器输出电流的典型波形

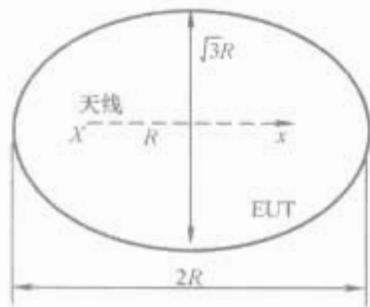


图 2.8-74 开阔场地的要求

至少应比标准规定的 EUT 骚扰限值低 6dB。现开阔场实际上已很难找到，因此，现在测试一般都在屏蔽室内进行。

(2) 屏蔽室。屏蔽室四周由金属材料包围，具有良好的隔离室内外的电磁场的功能，一般拼装式钢板屏蔽室屏蔽效能可达到 -70dB 以上 (10kHz 磁场) 以及 -100dB 以上 (200kHz~18GHz)。但被试设备发出的电磁波将在各个金属面上发生反射和多次反射，相当于一个矩形波导谐振腔，存在很多谐振频率，其表达式为

$$f_{i} = 150 \sqrt{(k/w)^2 + \left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2} \quad (2.8-60)$$

式中：w、l、h 分别为屏蔽室的宽、长、高，m、k、n 取 0、1、2、…，分别为横电波 TE_{kmn} 沿着宽、长、高的场的半个正弦波的数目，取不同的 k、m、n 就可求得屏蔽室内存在的不同的固有谐振频率，如果被测辐射源的频率恰好等于屏蔽室的固有谐振频率，则引起谐振，幅值加大，从而带来很大的测量误差。

(3) 半电波吸波暗室。在屏蔽室内测量 EMI，常可能获得高达 20~30dB 的误差。为减少反射对测量结果的影响，在屏蔽室的四壁和天花板上挂吸波材料，使到达这些面的电磁波被吸收，从而屏蔽室变成半电波吸波暗室。所谓“半”指地面不铺吸波材料，仍是反射面，因此半波暗室可模拟室外的开阔场地。金属板产生反射的原因是金属板的波阻抗比空气的波阻抗小很多，电磁波由空气入射到金属板时由于阻抗不匹配而产生反射。吸波材料夹在空气和金属板之间，使波阻抗逐渐过渡从而减小反射。吸波材料常常使用泡沫尖劈型介质材料，在碳胶液中渗透碳，使其尖端的波阻抗等于空气波阻抗，然后逐渐减小。由于渗了碳，吸波材料可把进入内部的电磁波以热量形式耗散。尖劈长度越长，频率越低，吸波性能就越好，一般长度为 l 的尖劈材料，其能吸收的最低频率的波长为 l/4。既然半电波暗室是为模拟开阔场而建的，暗室中的归一化场地衰减测试 (NSA) 应与开阔场相一致。测量值与标准值之差小于 ±4dB。CISPR22 标准中对半电波暗室模拟开阔场的 NSA 测量作出两项规定：

1) 用双锥和对数周期天线等宽带天线测量，而不用调

谐偶极子天线。原因为前者低频端几何尺寸较后者为小，又便于扫频测试之故。

2) 考虑到被试设备具有一定体积，设备上各点与周边吸波材料距离不同，应对被试设备所占空间进行多点 NSA 测量。具体是在发射天线所处中心位置及前、后、左、右各移动 0.75m 等 5 个点，以及发射天线在不同高度 (垂直极化时 1m 和 1.5m；水平极化时 1m 和 2m) 下进行。因此总共要进行 20 种组合情况下的 NSA 测量，包括 5 个位置，2 个高度，2 种极化。

(4) 测试面场的均匀性。进行电磁辐射敏感度测量时，需在被测设备 (EUT) 处产生规定的场强为 3~10V/m，这考察到是否会引起 EUT 工作性能下降。由于 EUT 表面有一定的范围，因此，在 EUT 区域内规定了一个 1.5m×1.5m 的垂直平面，要求该平面上场强均匀，这就是测试面场的均匀性。

具体做法是，把该面划分为 16 个点，如图 2.8-75 所示。按图示位置布置，用各向同性探头测量每个点的场强，取数值最接近的 12 个点的值，剔除另外 4 个。12 个值中，最大与最小值之差应小于 6dB，则认为该测试面场是均匀的，可进行电磁辐射敏感度检测。

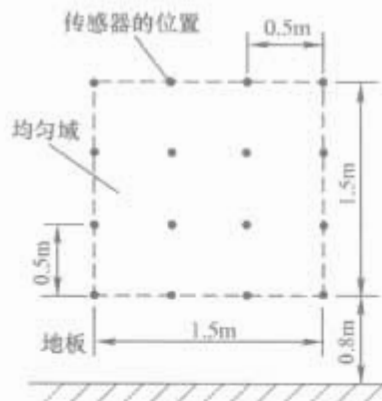


图 2.8-75 垂直平面 16 点测试位置

在均匀性测试时，要求在发射天线和被试设备间的地面上铺设吸波材料，防止地面反射影响场的均匀性。此外，各向同性探头应采用光缆与场强计相连。

同样地，场均匀性测量应是多频率 (80MHz~1GHz，步长不大于 10%)，多位置 (16 个点)、多极性 (垂直极化水平极化) 的测量。

(5) 列车现场测试要求如下：

1) 靠近测量点无树木、墙、桥梁、隧道或车辆，最小间隔距离：干线车辆为 30m，城市车辆为 10m。

2) 对电气线路，测量点应设在两接触网支撑杆的中间，且在轨道的相对一侧 (在双轨情况下，使用轨道一侧) 对于由第三轨供电的铁路系统，天线将在轨道的同一侧 (最坏的情况)。

3) 测量点两侧的高架线/第三轨应“无限长”，最小长度：干线车辆为 3km，城市车辆为 500m，应避免高架线/第三轨中止以及变电站、变压器、过分相区间、绝缘节等。由于高架线在射频条件下可能出现谐振，现有高架线的布局将被注明。如有必要，可改变试验现场。在测量列车噪声之前，必须知道或测量变电站的影响。

4) 应避免靠近电力线，包括地下电缆、变电站等。

5) 在相同的供电区间或在如下距离内无其他列车运行：干线车辆为 20km，城市车辆为 2km。如以上条件不能满足，必须记录被试列车每次测量发射之前和之后的环境噪声。另外，在开始及系列试验结束 2 次环境噪声的测量就足够了。如在规定的频率或特殊率范围内环境噪声小于限值曲线

6dB, 就没有要求考虑这些频率的测量。这些频率将在试验报告中提到。

5.4.2.2 试验布置

试验布置对测量结果影响很大。在实验室内试验的布置要求已在基础标准中作了详细的规定。这里重点阐明在现场测量列车的对外发射时的试验布置。

图 2.8-60 所示为在 9kHz~30MHz 频带中的磁场测量天线位置, 由图可知: 环形天线与轨道平行, 环形天线中心与轨道水平面之间的距离为 1.0~2.0m, 轨道中心线到环形天线的测试距离为 10m。

图 2.8-61 所示为 30~300MHz 频带内电场测量天线位置 (垂直极化), 由图可知: 双锥天线几何中心至轨道水平面之间的垂直距离为 3m, 天线与轨道中心距离为 10m, 做完垂直极化, 将天线旋转 90°, 再做水平极化测量。

图 2.8-62 所示为 300MHz~1GHz 频带内电场测量的天线位置 (垂直极化), 由图可知: 对数周期天线的几何中心距轨道平面 3m, 天线的几何中心距轨道中心的距离为 10m。做垂直极化测量后, 将天线旋转 90°, 再做水平极化测量。

5.4.3 试验步骤

实验室内的试验项目在基础标准中已给出了详细的试验步骤。这里重点介绍现场测试的试验步骤。

在现场测试过程中, 常采用以下步骤:

- (1) 选择一符合 5.4.2.1 (5) 条件的试验场地。
- (2) 按 5.4.2.2 进行试验布置。
- (3) 气候条件选择在 20℃, 且比较干燥的天气条件。
- (4) 利用铁道沿线的 220V 交流电源, 在 220V 交流电源上加隔离变压器及 UPS 稳定电源。
- (5) 测量仪器必须满足 CISPR16—1 标准的规定。

(6) 接收机使用 EMC 分析仪 (如 HP7405), 将带宽设置为表 2.8-19 所示数值。扫描选择峰值扫描, 时间选为 1s, 调用静态试验的限制值曲线如图 2.8-63 所示, 对慢行试验调用图 2.8-64 所示的限值曲线。

表 2.8-19 带宽设置值

代 号	频段范围 (Hz)	带宽 (Hz)
A	9~150k	200
B	0.15~30M	9k
C	30~300M	120k
D	300~1000M	120k

(7) 按图 2.8-60、图 2.8-61 和图 2.8-62 所示, 进行试验布置。

(8) 在每次测量前后, 进行背景噪声的测试并记录、保存。

(9) 作完水平极化测量后, 再作垂直极化测量, 2 个极化方向必须都做。

(10) 对被试机车或列车, 应记录其工作状态、运行速度等。

(11) 以上所有试验条款, 均需在试验报告中体现。

5.4.4 解决系统 EMC 试验问题的基本思路

当对电气产品做 EMC 试验时, 依据 TB/T3034 标准要求, 共要进行 8 项试验。如果系统设备在进行 EMC 试验时, 碰到了某些试验通不过的项目, 设计人员及试验人员往往就不知从何处下手。现给出电气设备在 EMC 测试时碰到测试项目通不过时的解决流程, 供系统设备测试查找、定位问题时参考 (见图 2.8-76~图 2.8-81)。

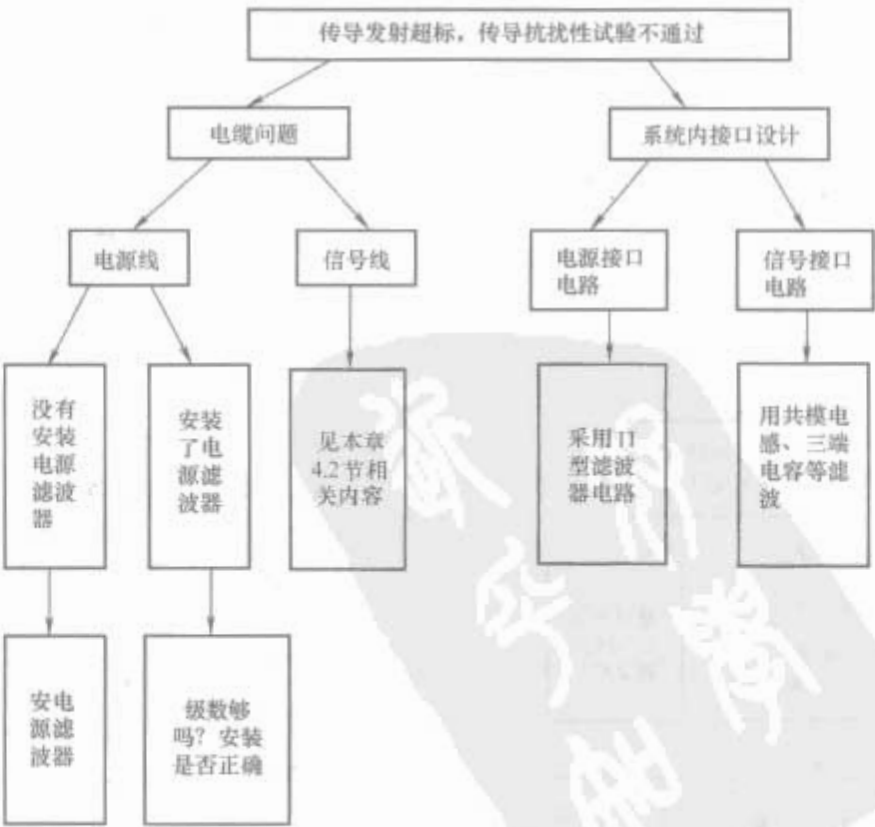


图 2.8-76 传导发射通不过的处理程序

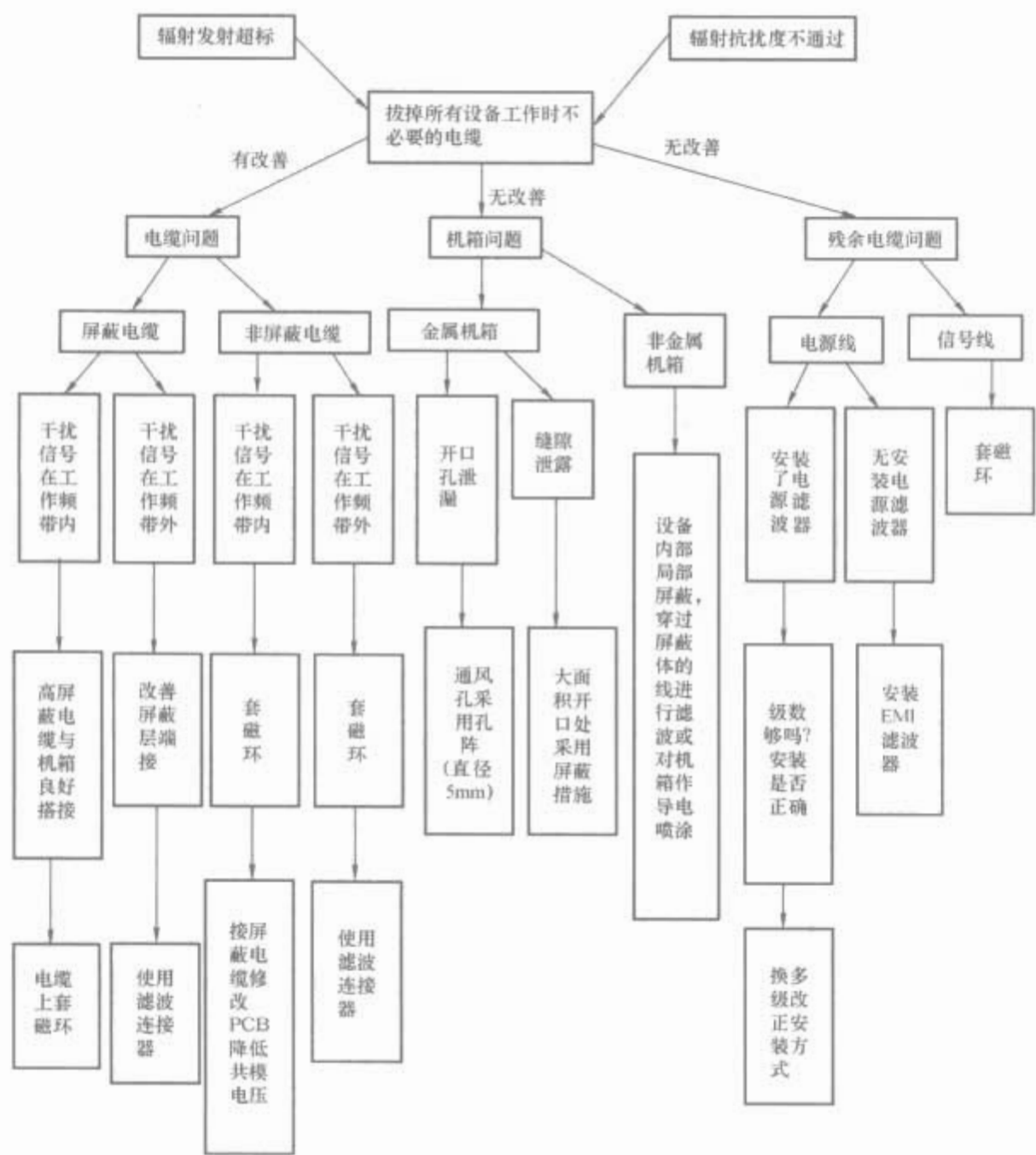


图 2.8-77 辐射发射，辐射抗扰性通不过的处理程序

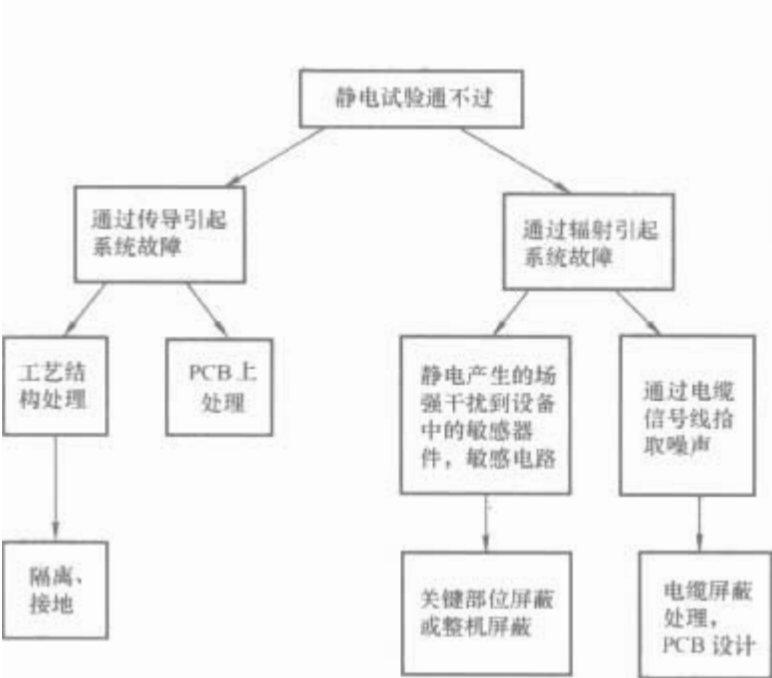


图 2.8-78 静电抗扰度通不过的处理程序

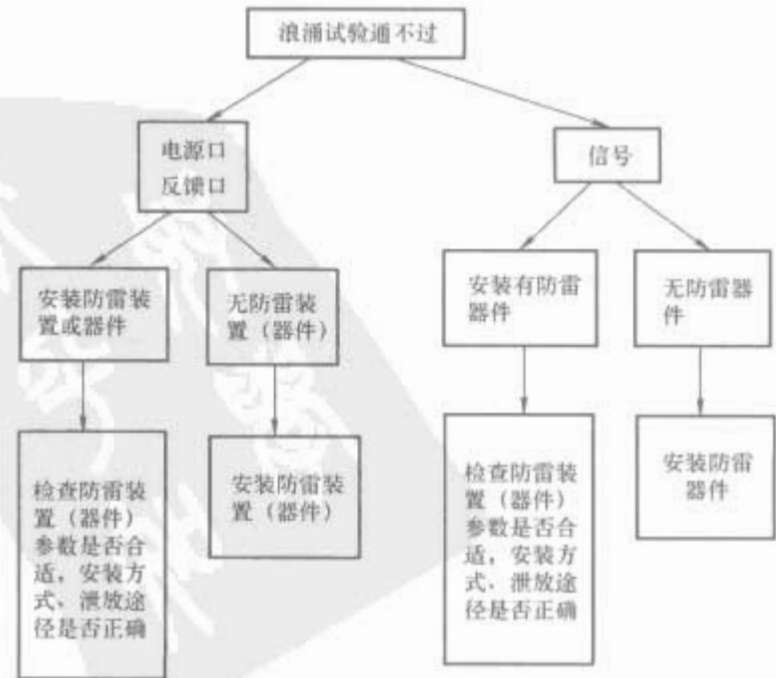


图 2.8-79 浪涌抗扰性通不过的处理程序

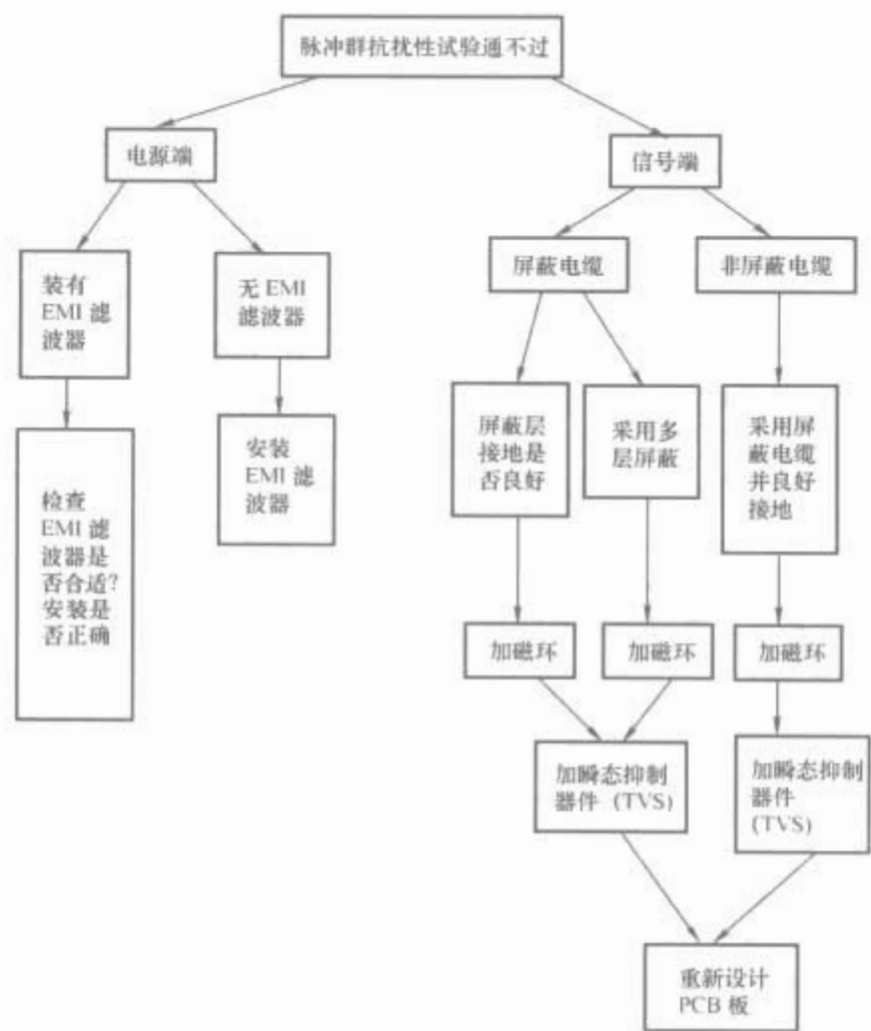


图 2.8-80 脉冲群抗扰性通不过的处理程序



图 2.8-81 电源滤波器问题处理程序

参 考 文 献

- [1] 黄克毅. 铁道概论. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [2] 胡耀华, 诸均安. 中国铁路通信世纪回顾. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [3] 叶庆文. 安车电气装置. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [4] 钱立新. 世界高速铁路技术. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [5] TB/T 1407—2003. 列车牵引计算规程.
- [6] 电机工程手册编委会. 电机工程手册, 2版. 应用卷(二). 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [7] 铁路机车车辆科技手册编委会. 铁路机车车辆科技手册. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [8] 高培庆. 劈相机. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- [9] 李江红, 马健, 彭辉水. 机车粘着控制的基本原理和方法. 机车电传动, 2002(6), 4-8.
- [10] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- [11] 张振林. 城市轨道交通车辆. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [12] IEC 61133—2006 电力机车车辆和电传动热力机车车辆制成后投入使用前的试验方法.
- [13] GB 14894—2004 城市轨道交通车辆组装后的检查与试验规则.
- [14] GB 3315—2006 内燃机车组装后的检查与试验规则.
- [15] GB/T 3318—2006 电力机车制成后投入使用前的试验方法.
- [16] 许荣华. 主变压器及电抗器. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- [17] 路长柏. 电力变压器绝缘技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [18] 沈阳变压器研究所. 变压器线圈制造. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [19] 冯江华, 陈高华. 大功率交流传动系统. 机车电传动, 2003(5): 40-50.
- [20] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [21] Depenbrock M. Speed-sensorless Stator-flux-oriented Control of induction drives in traction. Commun.Sci. Lett. univ. Zilima, 2001, 2(3): 68-75.
- [22] 李志明, 张遇杰. 同步电动机调速系统. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [23] 李永东. 交流电机数字控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [24] L. Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu, W-Lim. Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528-535.
- [25] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [26] 纳霍德金 M. 牵引电机设计. 余忠武, 等译. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [27] 郭芳. 用于磁悬浮列车的长定子同步直线电动机的电磁设计. 北方交通大学学报, 2003, 27(4), 97-100.
- [28] 程福秀, 林金铭. 现代电机设计. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [29] 李发海, 朱东起. 电机学, 3版. 北京: 科学出版社, 2001.
- [30] 陈华. 机车牵引电机. 北京: 工业标准出版社, 1990.
- [31] 杨志刚. LKJ2000 型列车运行监控记录装置. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [32] 贺威俊, 高仕斌, 张淑琴, 王勋. 电力牵引供变电技术. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.
- [33] 钱清泉. 电气化铁道远动技术. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
- [34] 于万聚. 高速电气化铁路接触网. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
- [35] 本书编委会. 最新电气化铁道接触网规划、设计、施工实用全书. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [36] KieBling, Puschmann, Schmieder. 电气化铁道接触网. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [37] 韦炳干, 王卫安. 动态无功补偿装置在电气化铁路上的应用. 机车电传动, 2006(2).
- [38] 刘弢, 郭知彼, 蒋家久. 牵引变电站静止无功补偿方案综述. 机车电传动, 2005(6).
- [39] GB 50157—2003 地铁设计规范.
- [40] GB 50025—1995 供配电系统设计规范.
- [41] GB 50053—1994 10kV 及以下变电所设计规范.
- [42] GB 50059—1992 35~110kV 变电所设计规范.
- [43] 魏晓乐. 城市轨道交通自动化系统与技术. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [44] 沈阳铝镁设计研究院电力室. 硅整流所电力设计. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [45] 吴翼平. 面向 21 世纪高等院校教材: 现代光纤通信系统. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [46] 韦乐平. 通信工程丛书: 接入网. 北京: 人民邮电出版社, 1998.
- [47] 唐宝民, 王文鼎, 李标庆. 电信网技术基础. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [48] 陈德荣, 等. 通信专业成人教育教材系列: 数字移动通信系统. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [49] 钟章队. 铁路综合数字移动通信系统(GSM-R). 中国铁道出版社, 2003.
- [50] 蒋林涛. 通信工程丛书: 多媒体通信网. 北京: 人民邮电出版社, 1999.
- [51] 胡道元. 审计署计算机审计中级培训系列教材: 计算机网络实用技术指南. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [52] 中国铁道百科全书总编辑委员会. 中国铁道百科全书: 通信信号. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [53] 当代中国铁道信号编辑委员会. 当代中国铁道路信号: 1986~1990. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [54] 当代中国铁道信号编辑委员会. 当代中国铁道路信号: 1991~1995. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- [55] 当代中国铁道信号编辑委员会. 当代中国铁道路信号: 1996~2000. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [56] 当代中国铁道信号编辑委员会. 当代中国铁道路信号: 2001~2005. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [57] 华茂昆, 周诒民, 吴昌元, 等. 铁路科技新知识. 北

- 京：中国铁道出版社，2006.
- [58] 刘华清，等. 德国磁悬浮列车 Transrapid. 成都：电子科技大学出版社，1995.
- [59] 吴祥明. 磁浮列车. 上海：上海科学技术出版社，2003.
- [60] 邓午天，李泽民. 线路工程. 成都：西南交通大学出版社，2000.
- [61] 铁道第三勘察设计院. 京沪高速铁路设计暂行规定，上册. 北京：中国铁道出版社，2003.
- [62] 曾正贤. 中铁十六局磁悬浮架梁技术堪比绣花. 科技日报，2006，12(3).
- [63] 魏庆朝，孔永健. 磁悬浮铁路系统与技术. 北京：中国科学技术出版社，2003.
- [64] 邱成悌，蒋全兴，等. 电子设备结构设计原理. 南京：东南大学出版社，2001.
- [65] 顾海洲，马双武. PCB 电磁兼容技术—设计实践. 北京：清华大学出版社，2004.
- [66] Bhang Singh Guru, 等. 电磁场与电磁波. 北京：机械工业出版社，1999.
- [67] 高攸纲. 屏蔽与接地. 北京：北京邮电大学出版社，2004.
- [68] 董光天. 电磁干扰测量与控制 1000 问. 北京：电子工业出版社，2003.
- [69] 王幸之，王雷，等. 单片机应用系统抗干扰技术. 北京：北京航空航天大学出版社，2000.
- [70] 沙斐. 机电一体化系统的电磁兼容技术. 北京：中国电力出版社，1999.
- [71] Mark I Montrose. 电磁兼容和印刷电路板. 北京：人民邮电出版社，2002.
- [72] 郭银景、吕文江，等. 电磁兼容原理及应用. 北京：清华大学出版社，2004.
- [73] 刘友梅. SS₆ 型电力机车. 北京：中国铁道出版社，1998.
- [74] 饶忠. 列车制动. 北京：中国铁道出版社，1998.



[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]
书名=中国电气工程大典 第13卷 交通电气工程
作者=刘友梅 (等) 主编
页数= 8 2 7
s s 号= 1 2 1 7 6 3 5 5
出版社=中国电力出版社
出版日期= 2 0 0 9 . 0 1